
Elektronikintegration und Verhalten des TR-Detektors bei Kollisionen am LHC

Electronics Integration and Performance of the TRD for Collisions at LHC

Master-Thesis von Andreas Köhler

Mai 2010



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

GSI Darmstadt
ALICE Transition Radiation Detector

Elektronikintegration und Verhalten des TR-Detektors bei Kollisionen am LHC
Electronics Integration and Performance of the TRD for Collisions at LHC

Vorgelegte Master-Thesis von Andreas Köhler

1. Gutachten: Prof. Dr. Peter Braun-Munzinger
2. Gutachten: Dr. Anton Andronic

Tag der Einreichung:

Erklärung zur Master-Thesis

Hiermit versichere ich, die vorliegende Master-Thesis ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 3. Mai 2010

(A. Köhler)

Zusammenfassung

Diese Master-Thesis beschäftigt sich hauptsächlich mit dem Übergangsstrahlungsdetektor (Transition Radiation Detector, TRD) des ALICE-Experiments am Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf. Hierzu wird zunächst der Aufbau des LHC und des ALICE-Experiments kurz beschrieben. Es folgen die Grundlagen der Übergangsstrahlung und der Aufbau des ALICE-Übergangsstrahlungs-Detektors. Auch die Grundlagen des bei Schwerionenkollisionen entstehenden Quark-Gluon-Plasmas (QGP), sowie der Bildung von Baryonen und Mesonen werden erläutert. Der Zusammenbau, die Bestückung und das Testen der einzelnen Detektorkammern des ALICE-TRD, im Speziellen der Supermodule VIII, IX und X, sind Bestandteil dieser Arbeit.

Außerdem werden in dieser Arbeit Kollisionsdaten aus dem ALICE-TRD dahingehend analysiert, dass die Leistungsfähigkeit der einzelnen Stacks des Übergangsstrahlungsdetektors untersucht wird. Dafür wurden Graphen erstellt, die verschiedene Datenauswertungen für alle eingebauten Stacks jeweils nebeneinander darstellen. So kann leichter ein Überblick über die Leistung der einzelnen Stacks für die verschiedenen untersuchten Runs gewonnen werden.

Abstract

In general, this Master-Thesis is about the ALICE Transition Radiation Detector (TRD) of the ALICE-experiment at the Large Hadron Collider (LHC) at CERN in Geneva. First, there is an overview about the LHC and ALICE is given, followed by the basics of the transition radiation and the layout of the TRD. Afterwards, Quark Gluon Plasma, which is produced in heavy ion collisions inside ALICE and the formation of particles are explained. Also the electronics integration of the ALICE-TRD-Readout-Chambers and the testing of the built chambers, especially those of the supermodules VIII, IX and X, is described.

In addition to that, there is an analysis of collision data of the ALICE-TRD done. This analysis examines the performance of the stacks of the TRD, by inventing some graphs, that show results of analyzed data for all stacks next to each other in one graph. This allows to get an overview and to compare the performance of the stacks more easily.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Aufbau der Materie	1
1.2	Quark-Gluon-Plasma	2
1.2.1	Quarks	2
1.2.2	Gluonen	3
1.2.3	Hadronen	3
2	Large Hadron Collider und ALICE-Übergangsstrahlungsdetektor	7
2.1	Der Large Hadron Collider	7
2.1.1	Atlas - A Toroidal LHC Apparatus	7
2.1.2	CMS - Compact Muon Solenoid	8
2.1.3	LHCb - Large Hadron Collider beauty	8
2.1.4	ALICE - A Large Ion Collider Experiment	9
2.1.5	Kleinere Experimente: LHCf und TOTEM	11
2.2	Der ALICE-Übergangsstrahlungsdetektor	11
2.2.1	Theoretische Grundlagen der Übergangsstrahlung	12
2.2.2	Aufbau des Detektorkörpers	13
3	Kammerbau und Auswertung der Kammertests	16
3.1	Elektronikintegration	16
3.2	Kammertests	16
3.3	Auswertung der Elektronik-Tests	17
3.4	Auswertung der Messungen des Rauschverhaltens	17
4	Leistungsauswertung bei Teilchenkollisionen	20
4.1	Analyse von Kollisionen	20
4.2	Run 114783	21
4.3	Run 115186	31
4.4	Run 115890	32
4.5	Run 116203	33
4.6	Problematische Kammern	34
5	Zusammenfassung und Ausblick	35
5.1	Kammerbau und Testverfahren	35
5.2	Leistungsanalysen	35
A	Bilder der Ausleseelektronik	I
B	Befehle für Kammertests	III
C	Plots zu Messungen des Rauschverhaltens	V
C.1	L5C1 048	V
C.2	Supermodul VIII	IX
C.3	Supermodul IX	XI
C.4	Supermodul X	XIII
	Literaturverzeichnis	XV
	Danksagung	XVII

Abbildungsverzeichnis

1.1	Die Familien im Standardmodell der Teilchenphysik	1
1.2	Übersicht über die Elementarkräfte	2
1.3	Baryon-Multipletts	4
1.4	Meson-Multipletts	6
2.1	Der LHC in der Übersicht	7
2.2	Das ATLAS-Experiment	8
2.3	Das CMS-Experiment	8
2.4	Das LHCb-Experiment	9
2.5	Das ALICE-Experiment mit Subdetektoren	9
2.6	Schema des TRD-Aufbaus	13
2.7	Querschnitt durch ALICE mit dem TRD	14
2.8	Funktionsweise des ALICE-TRD	15
2.9	Teilchenidentifikation über Signalhöhe	15
3.1	Signalverteilung L5 der Supermodule VII, IX und X (Mean)	18
3.2	Signalverteilung L5 der Supermodule VII, IX und X (RMS)	18
4.1	SM 00 im Run 114783	22
4.2	SM 01 im Run 114783	23
4.3	SM 07 im Run 114783	24
4.4	SM 08 im Run 114783	25
4.5	SM 09 im Run 114783	26
4.6	SM 10 im Run 114783	27
4.7	SM 17 im Run 114783	28
4.8	Alle Supermodule im Run 114783	29
4.9	stack-weise Verlaufsübersichten zu Run 114783	30
4.10	stack-weise Verlaufsübersichten zu Run 115186	31
4.11	stack-weise Verlaufsübersichten zu Run 115890	32
4.12	stack-weise Verlaufsübersichten zu Run 116203	33
A.1	L5-Kammer und ROB mit Cooling-Pipes	I
A.2	ORI- und DCS-Board	I
A.3	Cable-Boards L0 und L5 und Kabelbrückentester	II
C.1	Messung des Rauschverhaltens von L5C1 048 (NF)	V
C.2	Messung des Rauschverhaltens von L5C1 048 (P)	VI
C.3	Messung des Rauschverhaltens von L5C1 048 (PGT)	VI
C.4	Pulsertest von L5C1 048	VII
C.5	Signalverteilung L5C1 048	VIII
C.6	SM VIII in NF-Konfiguration	IX
C.7	SM VIII in P-Konfiguration	X
C.8	SM VIII in PGT-Konfiguration	X
C.9	SM IX in NF-Konfiguration	XI
C.10	SM IX in P-Konfiguration	XII
C.11	SM IX in PGT-Konfiguration	XII
C.12	SM X in NF-Konfiguration	XIII
C.13	SM X in P-Konfiguration	XIV
C.14	SM X in PGT-Konfiguration	XIV

Tabellenverzeichnis

1.1	Quark-Eigenschaften	3
1.2	Baryonen und ihre Zusammensetzung	5
1.3	Mesonen und ihre Zusammensetzung	6
3.1	Übersicht über gebaute Kammern	16
3.2	Reihenfolge der Kammertests	17
3.3	Übersicht über das Rauschverhalten der Kammern	19
4.1	Übersicht über die Daten der analysierten Runs	20
4.2	Zuordnung der Supermodule zu den eindeutigen Stacknummern im aktuellen ALICE-TRD	21
4.3	Zuordnung der Supermodule zu den ALICE-TRD-Slots	21
4.4	Stacks mit niedrigen Anteilen an Tracks mit 6 Tracklets in Run 114783	31
4.5	Stacks mit niedrigen Anteilen an Tracks mit 6 Tracklets in Run 115186	32
4.6	Stacks mit niedrigen Anteilen an Tracks mit 6 Tracklets in Run 115890	33
4.7	Stacks mit niedrigen Anteilen an Tracks mit 6 Tracklets in Run 116203	34
4.8	Problematische Kammern	34

Quark *[aus dem Slawischen], aus Milch durch Säuerung oder Labfällung und Abtrennen der Molke gewonnenes Frischkäseprodukt, das vorallem aus geronnenem, weiß ausgeflocktem (noch stark wasserhaltigem) Kasein besteht.*

Brockhaus-Enzyklopädie, 19. Auflage

1 Einführung

Dieses Kapitel gibt eine Einführung in den Aufbau der Materie und den Large Hadron Collider am europäischen Kernforschungsinstitut CERN in Genf.

1.1 Aufbau der Materie

Bereits im Altertum wurden Theorien über die Zusammensetzung der uns umgebenden Materie entwickelt. Einen Anfang machte im 5. vorchristlichen Jahrhundert die Theorie über die vier Elemente Feuer, Wasser, Erde und Luft, aus denen sich alle Materialien durch unterschiedliche Zusammensetzung der vier Bausteine herstellen lassen sollten. Die Theorien entwickelten sich weiter und nach dem Atom als kleinste Einheit der Materie, wurde mit dem Elektron 1897 das erste wirkliche Elementarteilchen entdeckt. Daraufhin folgten das Proton 1919 und das Neutron erst 1932. In der heutigen Zeit ist das Wissen über die Bausteine der Materie des Universums im Standardmodell der Teilchenphysik vereinigt, das alle bekannten Teilchen nach ihrem Spin in zwei Gruppen einteilt: Einerseits sind das die Fermionen, zu denen unter Anderen auch das Elektron und die Neutrinos (Leptonen) sowie Quarks gehören und andererseits die Bosonen, zu denen alle Austauschteilchen gehören. Zusätzlich wird ein Fermion einer von drei Familien zugeordnet. Das geschieht nach den Eigenschaften der Familienmitglieder, wie beispielsweise der Masse. [1]

FERMIONS			matter constituents			BOSONS			force carriers		
Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2			Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_L lightest neutrino*	$(0-0.13)\times 10^{-9}$	0	u up	0.002	2/3	γ photon	0	0	g gluon	0	0
e electron	0.000511	-1	d down	0.005	-1/3	W⁻	80.39	-1			
ν_M middle neutrino*	$(0.009-0.13)\times 10^{-9}$	0	c charm	1.3	2/3	W⁺	80.39	+1			
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3	W bosons					
ν_H heaviest neutrino*	$(0.04-0.14)\times 10^{-9}$	0	t top	173	2/3	Z⁰ Z boson	91.188	0			
τ tau	1.777	-1	b bottom	4.2	-1/3						

Abb. 1.1: Die Familien im Standardmodell der Teilchenphysik [2]. Ganz links sind die sechs verschiedenen Leptonen zu sehen, rechts daneben die jeweils dazugehörigen Quarks (Quark-Flavours). Das Top-Quark wird auch Truth-Quark genannt, das Bottom-Quark Beauty-Quark. Auf der rechten Seite sind die aktuell nachgewiesenen Austauschbosonen dargestellt.

Protonen und Neutronen gehören zur Gruppe der Hadronen, welche durch die Quarks als elementare Bausteine gebildet werden. Der Nachweis gelang durch inelastische Streuexperimente. Wie in der obenstehenden Abbildung 1.1 zu sehen ist, existieren mehrere Arten von Quarks, die sogenannten Flavours. Quarks haben die grundlegende Eigenschaft, dass sie niemals alleine anzutreffen sind. Sie bilden jeweils zu dritt Baryonen. Dafür verantwortlich ist die Farbladung der Quarks (rot, grün, blau) und das Austauschboson der Quarks, das Gluon. Weiterhin gibt es Mesonen, welche aus einem Quark und einem Antiquark bestehen. Theoretisch ist noch ein Pentaquark-Teilchen, das aus fünf Quarks (vier Quarks und ein Antiquark) gebildet wird, möglich, jedoch konnte es bisher nicht nachgewiesen werden.

Aus der Tatsache, dass Mesonen und Baryonen keine effektive Farbladung tragen, folgt, dass die Gluonen ebenfalls eine Farbladung tragen müssen, die sich aus einer Farbe und einer Antifarbe zusammensetzen kann. So wird sichergestellt, dass Mesonen und Baryonen eine neutrale (weiße) Farbladung tragen. Das hat zur Folge, dass acht verschiedene Arten von Gluonen existieren, die jeweils eine andere Farbladung besitzen. Der Ladungsaustausch ist Inhalt der Quanten-Chromo-Dynamik QCD. Aufgrund ihrer Farbladungen können Gluonen auch untereinander wechselwirken. Das Potential der Quarks nimmt somit auf kurzen Distanzen eine coulombartige Form an und mit $1/r$ ab, während es bei größeren Abständen in linearer Form mit r ansteigt. Das vereinfachte Potential der Farbladungen nimmt zusammengefasst also die Form

$$V = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr \tag{1.1}$$

an, wobei hier α_s die Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung und k einen Parameter beschreibt. Diese Form beschränkt nun die Existenz der Quarks auf farbladungsneutrale Teilchen (Confinement), freie Quarks sind durch dieses Potential nicht möglich. Allerdings ist es möglich, die Quarks durch die $1/r$ -Abhängigkeiten bei kleinen Abständen und hohen Impulsüberträgen als quasifreie Teilchen zu betrachten. Diese Zustände lassen sich durch Schwerionenkollisionen herbeiführen und existierten auch kurz nach dem Urknall.

Die GUT (Grand Unified Theory) beschreibt die Vereinigung der vier Elementarkräfte (Gravitation, elektromagnetische Kraft, starke und schwache Wechselwirkung; siehe Abbildung 1.2) zum Zeitpunkt des Urknalls vor 13 Milliarden Jahren. Auch heute kann sie wieder drei dieser Kräfte wieder vereinen, jedoch ist es bisher nicht gelungen, die Gravitation erfolgreich in die GUT einzubinden. Außerdem sind in besagter Theorie die vier Austauschbosonen (Photonen, Gluonen, W- und Z-Bosonen und Gravitonen), die die Elementarkräfte austauschen, masselos, da sich die GUT sonst mathematisch nicht erklären ließe. Jedoch kann aber durch Messungen allen Austauschbosonen mit Ausnahme des Gravitons, für das es bisher noch keinen Nachweis gibt, eine Masse zugewiesen werden (W-Boson: $80 \text{ GeV}/c^2$; Z-Boson: $91 \text{ GeV}/c^2$ [3]; siehe auch Abbildung 1.1 rechts).

Properties of the Interactions				
The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.				
Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons
Strength at	10^{-18} m	0.8	1	25
	$3 \times 10^{-17} \text{ m}$	10^{-41}	1	60

Abb. 1.2: Die Elementarkräfte mit ihren Proportionen in der Übersicht [2]. Die Gravitationskraft trennte sich schon kurz nach dem Urknall von den drei weiteren Elementarkräften. Auch die verbleibenden Elementarkräfte trennten sich, aber erst „lange Zeit“ später, aber dennoch innerhalb der ersten Sekunde nach dem Urknall. Die GUT versucht, diese Kräfte wieder zusammenzuführen.

Hier wird nun das Higgs-Teilchen vorhergesagt, das letzte fehlende Teilchen um das Standardmodell vollständig zu erklären. Dieses Teilchen, das wiederum ein Austauschboson ist, begründet die Massen der anderen Austauschbosonen durch die Wechselwirkung über das Higgs-Boson in dem sogenannten Higgs-Feld. Weil die Massen von Z- und W-Bosonen unabhängig vom Ort und der Orientierung im Universum sein sollen, müssen diese Higgs-Felder skalar sein. Nach der Theorie der elektroschwachen Vereinheitlichung, welche alle Teilchen mit Ausnahme der W- und Z-Bosonen und der ungeladenen Leptonen als masselos ansieht, werden daher vier Higgs-Felder vorausgesagt, eines für jedes Boson.

Aus diesen Feldern gehen nunmehr drei Higgs-Bosonen hervor, von denen jedoch zwei von W- und Z-Bosonen absorbiert werden, welche so ihre Masse erhalten. Das Photon bleibt weiterhin masselos, somit muss ein freies Higgs-Boson existieren [1]. Das Higgs-Boson ist ungeladen und hat voraussichtlich eine Masse größer als $114,4 \text{ GeV}/c^2$ (H^0) und größer als $79,3 \text{ GeV}/c^2$ (H^\pm) [3]. Durch die Proton-Proton-Kollisionen am Large Hadron Collider (LHC) und den darin aufgebauten Experimenten (ATLAS und CMS) wird versucht, das Higgs-Boson herzustellen und nachzuweisen. [4]

1.2 Quark-Gluon-Plasma

Durch die hohen Energien, bei denen Teilchenkollisionen im Inneren des Alice-Detektors stattfinden, entsteht bei der Kollision schwerer Kerne ein Quark-Gluon-Plasma, in dem sich quasi freie Quarks und Gluonen befinden. Dieser quasi freie Zustand hält aber nicht lange an und die Quarks und Gluonen gruppieren sich sofort neu. Das Quark-Gluon-Plasma besteht nicht nur aus den vorher in den Kernen enthaltenen Elementarteilchen, da bei der Kollision durch die freiwerdende Energie auch andere Quark-Antiquark-Paare entstanden sind (Paarbildung). Die durch die Neugruppierungen entstandenen Teilchen werden dann durch ihre Zerfallsprodukte in den Detektoren und Subdetektoren nachgewiesen.

1.2.1 Quarks

Nach dem derzeitigen Wissensstand existieren sechs verschiedene Quarks, die sich nach ihren Eigenschaften in drei Gruppen (Familien) einordnen lassen. Die weitaus bekanntesten und häufigsten Quarks sind die, welche die Bausteine

der normalen Materie, also die Protonen und Neutronen bilden: Das Up-Quark (u) und das Down-Quark (d). Sie sind mit Abstand die leichtesten Quarks bei einer Masse von $0,002 \text{ GeV}/c^2$ (u) bzw. $0,005 \text{ GeV}/c^2$ (d). In der zweiten Gruppe befinden sich das Charm-Quark (c) und das Strange-Quark (s), welche mit einer Masse von $1,3 \text{ GeV}/c^2$ (c) und $0,1 \text{ GeV}/c^2$ (s) schon deutlich schwerer sind als u- und d-Quark, jedoch bisher nicht in den in der Natur vorkommenden Teilchen, sondern nur in bei Kollisionsexperimenten entstandenen Teilchen nachgewiesen worden sind. Die letzte Gruppe besteht aus dem Top-Quark (manchmal auch Truth-Quark genannt, t) und dem Bottom-Quark (Beauty-Quark, b). Sie sind die weitaus schwersten Quarks ($173 \text{ GeV}/c^2$ (t) und $4,2 \text{ GeV}/c^2$ (b)) und wurden auch nur in Kollisionsexperimenten nachgewiesen. Eine Übersicht über diese Angaben befindet sich auch in Abbildung 1.1. Die Tabelle 1.1 führt alle Quarks mit ihren jeweiligen Eigenschaften auf. [3]

Quark	Masse	Ladung [e]	I_3	J^P	Strangeness	Charm	Bottom	Top
Up	$1,5 - 3,3 \text{ MeV}/c^2$	$+2/3$	$1/2$	$1/2^+$	0	0	0	0
Down	$3,5 - 6,0 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$-1/2$	$1/2^+$	0	0	0	0
Charm	$1,27^{+0,07}_{-0,11} \text{ GeV}/c^2$	$+2/3$	0	$1/2^+$	0	+1	0	0
Strange	$104^{+26}_{-34} \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	0	$1/2^+$	-1	0	0	0
Top	$171,2 \pm 2,1 \text{ GeV}/c^2$	$+2/3$	0	$1/2^+$	0	0	0	+1
Bottom	$4,2^{+0,17}_{-0,07} \text{ GeV}/c^2$	$-1/3$	0	$1/2^+$	0	0	-1	0

Tab. 1.1: Quark-Eigenschaften im Überblick. Die Massendifferenz bei Up- und Down-Quark ist nicht unumstritten und wird weiter untersucht. In der Literatur finden sich sogar Mutmaßungen, dass das u-Quark masselos ist. I_3 bezeichnet die dritte Komponente des Isospins (auch I_z genannt) und dient zur Unterscheidung von Neutron und Proton, die bezüglich der Starken Wechselwirkung identische Teilchen sind. J^P ist eine kurze Angabe für den Gesamtdrehimpuls des Teilchens und dessen Parität. Strangeness, Charm, Bottom (auch Beauty genannt) und Top (oder auch Truth) sind Hilfsgrößen, mit denen sich zusammengesetzte Teilchen übersichtlicher beschreiben lassen, da sie sich direkt auf die enthaltenen Quarks beziehen. [3]

1.2.2 Gluonen

Wie bereits in Kapitel 1.1 erwähnt, wird die Kraft der starken Wechselwirkung durch farbgeladene Austauscheteilchen, den Gluonen, übertragen. Da Quarks ausserhalb des Quark-Gluon-Plasmas nur gebunden in Farbneutralen Objekten vorkommen, tragen Gluonen sowohl Farbe als auch Antifarbe als Ladung. Die Gruppentheorie gliedert diese 3×3 möglichen Zustände in zwei Multipletts, ein Singulett und ein Oktett. Das Oktett bildet ein System aus Basiszuständen, aus denen alle Farbkombinationen erzeugt werden können. Das Singulett setzt sich symmetrisch aus allen drei Farben und Antifarben zusammen, wirkt nicht farbspezifisch und kann folglich auch nicht zum Farbaustausch dienen. Die genaue Wahl der Basiszustände des Oktetts hängt von der Konvention ab, möglich sind die unten aufgeführten Zustände.

$$\begin{aligned} \text{Oktett: } & r\bar{g}, r\bar{b}, g\bar{b}, g\bar{r}, b\bar{r}, b\bar{g}, \sqrt{1/2}(r\bar{r} - g\bar{g}), \sqrt{1/6}(r\bar{r} + g\bar{g} - 2b\bar{b}) \\ \text{Singulett: } & \sqrt{1/3}(r\bar{r} + g\bar{g} + b\bar{b}) \end{aligned}$$

1.2.3 Hadronen

Da Quarks wegen des Confinements nicht alleine vorkommen können, bilden jeweils drei Quarks ein Baryon oder ein Quark-Antiquark-Paar ein Meson. Mesonen und Baryonen gehören zur Gruppe der Hadronen. Weiterhin sind durch die Theorie auch Pentaquark-Zustände (Teilchen aus fünf Quarks) postuliert worden. Wegen des fehlenden experimentellen Nachweises wird hier darauf nicht näher eingegangen.

Baryonen

Die Anzahl der bei sechs Quarks zu erwartenden Baryonen liegt bei $6^3 = 216$ und erhöht sich nochmals durch verschiedene Spins. Verbotene Zustände verursachen nur eine geringe Änderung dieser Zahl nach unten, daher beschränkt sich die folgende Beschreibung lediglich auf Baryonen, welche aus den u-, d- und s-Quarks gebildet werden und den relativen Bahndrehimpuls $l=0$ besitzen. Aus diesen drei Quarks lassen sich mit den verschiedenen Spins in zwei Multipletts insgesamt 18 verschiedene Teilchen bilden. Hierzu gehören sowohl die allgemein bekannten Protonen und Neutronen,

aber auch exotischere Teilchen, wie zum Beispiel das Δ^{++} mit einer Ladung $Q=2$ und zusammengesetzt aus 3 u-Quarks.

Der Grund für die Existenz zweier Multipletts liegt darin, dass die Spins der baryonbildenden Quarks verschieden ausgerichtet sein können, wenn ein Baryon gebildet wird. Die Quarks unterliegen als Fermionen dem Pauli-Prinzip, was zur Folge hat, dass die Gesamtwellenfunktion des Baryons

$$\psi_{total} = \xi_{Ort} \cdot \zeta_{Flavour} \cdot \chi_{Spin} \cdot \phi_{Farbe} \quad (1.2)$$

total antisymmetrisch bezüglich der Vertauschung zweier Quarks sein muss. Aus diesen Überlegungen ergibt sich nun einerseits ein Baryonen-Dekuplett mit dem Drehimpuls $3/2$ (parallelen Quark-Spins) und positiver Parität ($J^P = 3/2^+$).

Bei den Baryonen mit $J^P = 1/2^+$ ist die Sache etwas komplizierter, da die Spinwellenfunktion hier eine gemischte Symmetrie bezüglich der Vertauschung zweier Spinvektoren hat (Wellenfunktion ist weder rein symmetrisch, noch rein antisymmetrisch [1]). Mit diversen Rechnungen, die zum Beispiel in [1] nachgelesen werden können, ergeben sich hier zwei Baryonendupletts (Proton und Neutron sowie Ξ^0 und Ξ^-), ein Baryonentriplett (Σ^0 , Σ^+ und Σ^-) sowie ein Singulett (Λ^0). Diese Multipletts lassen sich aber in einem Baryonenoktett zusammenfassen. Von der Zusammensetzung sind Σ^0 und Λ^0 gleich, jedoch sind die Spins der Quarks verschieden. Dadurch unterscheiden sich diese Teilchen auch in ihren Eigenschaften (siehe Tabelle 1.2).

$$|\Sigma^{0\uparrow}\rangle = |u^\uparrow d^\uparrow s^\downarrow\rangle \quad (1.3)$$

$$|\Lambda^{0\uparrow}\rangle = |u^\uparrow d^\downarrow s^\uparrow\rangle \quad (1.4)$$

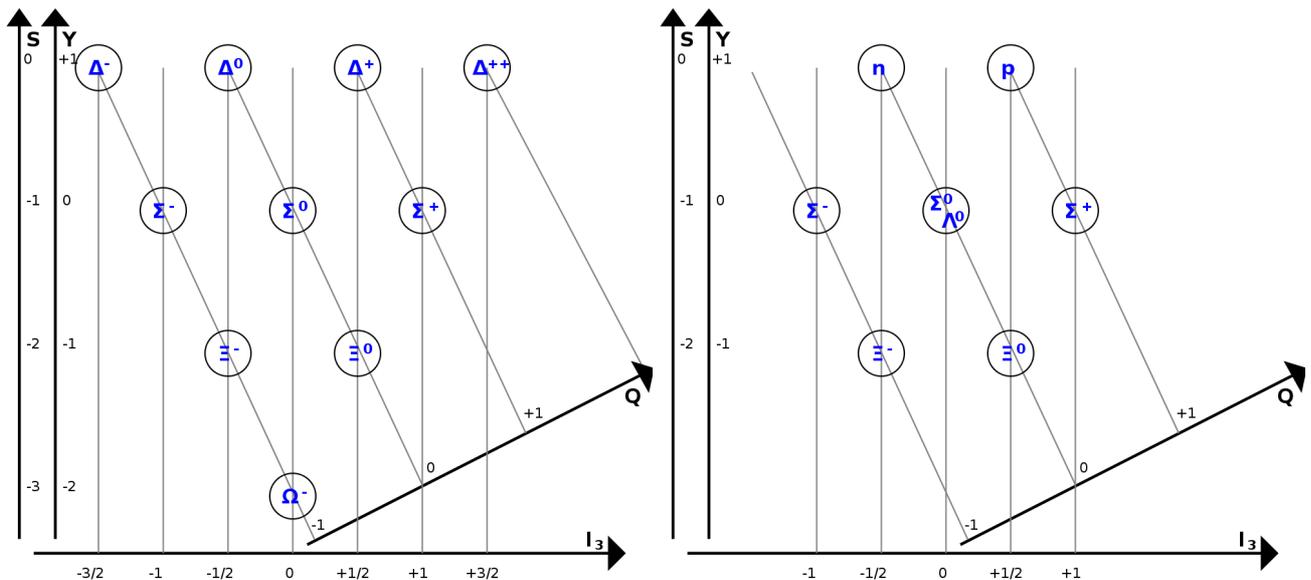


Abb. 1.3: Die Baryon-Multipletts mit dem Dekuplett (links) bei $J^P = 3/2^+$ und das Oktett (rechts) bei $J^P = 1/2^+$ [5]. Weiter ist Q die Ladung und Y die Hyperladung, die sich durch $Y = 2(Q - I_3)$ ergibt. Die Baryonenzahl ist $+1$ für Baryonen und -1 für Antibaryonen.

	Baryon	qqq	m [MeV/c ²]	J ^P	Q	S	Y
Dekuplett	Δ^-	ddd	~ 1232	$3/2^+$	-1	0	+1
	Δ^0	udd	~ 1232	$3/2^+$	0	0	+1
	Δ^+	uud	~ 1232	$3/2^+$	+1	0	+1
	Δ^{++}	uuu	~ 1232	$3/2^+$	+2	0	+1
	Σ^{*-}	dds	1387,2	$3/2^+$	-1	-1	0
	Σ^{*0}	uds	1383,7	$3/2^+$	0	-1	0
	Σ^{*+}	uus	1382,8	$3/2^+$	+1	-1	0
	Ξ^{*-}	dss	1531,8	$3/2^+$	-1	-2	-1
	Ξ^{*0}	uss	1535,0	$3/2^+$	0	-2	-1
	Ω^-	sss	1672,5	$3/2^+$	0	-3	-2
Oktett	n	udd	939,6	$1/2^+$	0	0	+1
	p	uud	938,2	$1/2^+$	+1	0	+1
	Σ^-	dds	1197,4	$1/2^+$	-1	-1	0
	Σ^0	uds	1192,6	$1/2^+$	0	-1	0
	Λ^0	uds	1115,7	$1/2^+$	0	-1	0
	Σ^+	uus	1189,4	$1/2^+$	+1	-1	0
	Ξ^-	dss	1321,7	$1/2^+$	-1	-2	-1
	Ξ^0	uss	1314,9	$1/2^+$	0	-2	-1

Tab. 1.2: Baryonen aus Abbildung 1.3 und ihre Zusammensetzung. Zusätzlich sind einige weitere Eigenschaften (Masse, Drehimpuls und Parität, Ladung Q, Strangeness S und Hyperladung Y) aufgeführt. [3]

Mesonen

Im Gegensatz zu den Baryonen, bestehen Mesonen nur aus zwei Quarks. Um eine neutrale Farbladung zu haben, müssen Mesonen folglich aus einem Quark-Antiquark-Paar bestehen. Diese beiden Quarks (das Antiquark sei im Folgenden auch als Quark bezeichnet) können ihren Spin in diesem Fall zu einem Gesamtspin $S = 0$ einerseits oder $S = 1$ andererseits koppeln. Hieraus ist bereits erkennbar, dass es, im hier betrachteten Rahmen, erneut zwei Multipletts zu geben scheint. Die Mesonen des Multipletts mit der Eigenschaft $J^P = 1^-$ werden *Vektormesonen* genannt, während die Mesonen des anderen Multipletts ($J^P = 0^-$) *pseudoskalare Mesonen* heißen. Für diese Multipletts erwartet man, aus der Kombination von drei Quarks mit drei Antiquarks jeweils neun Mesonen pro Multiplett.

Durch die Ähnlichkeit der Eigenschaften der u- und d-Quarks, treten hier Vermischungen der $u\bar{u}$ - und $d\bar{d}$ -Zustände auf, man spricht hier von einem Isospinformalismus. Up- und Down-Quark bilden ein Isospin-Duplett. Durch quantenmechanische Effekte und Überlegungen stellt man fest, dass somit nicht alle Mesonen der Multipletts aus einem Quark und einem Antiquark gebildet werden, sondern dass auch vermischte Zustände existieren, wie in den folgenden Gleichungen mit den Mesonen der u- und d-Quarks dargestellt. Dies hat auch zur Folge, dass ein Isospin-Triplett und ein Isospin-Singulett entstehen, erkennbar auch an der Benennung der Mesonen (Triplett: ρ^+ , ρ^- und ρ^0 , Singulett: ω).

$$|\rho^+\rangle = |u^\uparrow \bar{d}^\uparrow\rangle \quad (1.5)$$

$$|\rho^-\rangle = |\bar{u}^\uparrow u^\uparrow\rangle \quad (1.6)$$

$$|\rho^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |u^\uparrow \bar{u}^\uparrow\rangle - |d^\uparrow \bar{d}^\uparrow\rangle \} \quad (1.7)$$

$$|\omega\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |u^\uparrow \bar{u}^\uparrow\rangle + |d^\uparrow \bar{d}^\uparrow\rangle \} \quad (1.8)$$

Die in den Gleichungen 1.5 bis 1.8 gezeigten Zustände gehören zum Multiplett der Vektormesonen, das durch vier K^* -Mesonen und das φ -Meson komplettiert wird (vergleiche Abbildung 1.4 und Tabelle 1.3).

Die Zustände des Multipletts der pseudoskalaren Mesonen sind analog aufgebaut, nur sind hier die Vermischungen der Zustände anders. Die K^* -Vektormesonen entsprechen den pseudoskalaren K-Mesonen, die ρ -Mesonen den π -Mesonen. Der Zustand des π^0 -Mesons setzt sich gleich dem Zustand des ρ^0 -Mesons zusammen. Eine Ausnahme bilden hier die η -Mesonen.

$$|\eta\rangle = \frac{1}{\sqrt{6}} \{ |u^\uparrow \bar{u}^\uparrow\rangle + |d^\uparrow \bar{d}^\uparrow\rangle - 2 |s^\uparrow \bar{s}^\uparrow\rangle \} \quad (1.9)$$

$$|\eta'\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}} \{ |u\bar{u}\rangle + |d\bar{d}\rangle + |s\bar{s}\rangle \} \quad (1.10)$$

Durch den großen Massenunterschied der u- und d-Quarks zum s-Quark sind diese Zustände untereinander nur wenig vermischt. η' (Gleichung 1.10) ist also nahezu ein reiner $s\bar{s}$ -Zustand während bei η (Gleichung 1.9) der $s\bar{s}$ -Anteil kaum ins Gewicht fällt. Daher ist in Tabelle 1.3 auch jeweils nur ein vereinfachtes Schema zur Zusammensetzung angegeben.

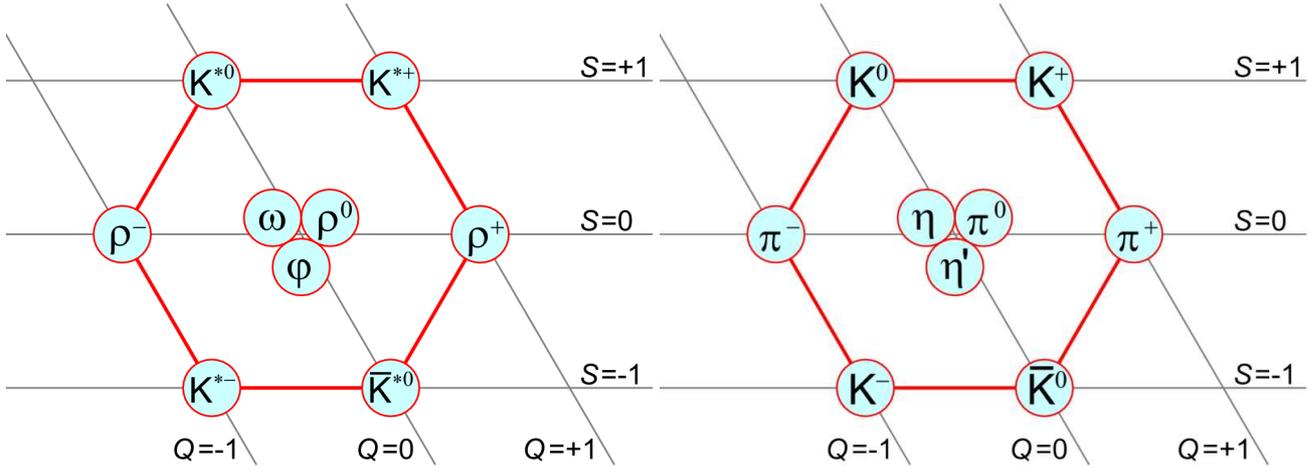


Abb. 1.4: Die Mesonnetze mit $J^P = 1^-$ (Vektormesonen, links) und $J^P = 0^-$ (pseudoskalare Mesonen, rechts) [6].

	Meson	$q\bar{q}$	m [MeV/c ²]	J^P	Q	S
Vektormesonen	K^{*0}	$d\bar{s}$	896,0	1^-	0	+1
	K^{*+}	$u\bar{s}$	891,6	1^-	+1	+1
	ρ^-	$d\bar{u}$	775,5	1^-	-1	0
	ρ^0	$u\bar{u} - d\bar{d}$	775,5	1^-	0	0
	ω	$u\bar{u} + d\bar{d}$	782,7	1^-	0	0
	φ	$s\bar{s}$	1019,5	1^-	0	0
	ρ^+	$u\bar{d}$	775,5	1^-	+1	0
	K^{*-}	$s\bar{u}$	891,6	1^-	-1	-1
	\bar{K}^{*0}	$s\bar{d}$	896,0	1^-	0	-1
pseudoskalare Mesonen	K^0	$d\bar{s}$	497,6	0^-	0	+1
	K^+	$u\bar{s}$	493,7	0^-	+1	+1
	π^-	$d\bar{u}$	139,6	0^-	-1	0
	π^0	$u\bar{u} - d\bar{d}$	135,0	0^-	0	0
	η	$u\bar{u} + d\bar{d}$	547,9	0^-	0	0
	η'	$s\bar{s}$	957,6	0^-	0	0
	π^+	$u\bar{d}$	139,6	0^-	+1	0
	K^-	$s\bar{u}$	493,7	0^-	-1	-1
	\bar{K}^0	$s\bar{d}$	497,7	0^-	0	-1
weitere Mesonen	J/Ψ (1S)	$c\bar{c}$	3096,9	1^-	0	0
	Υ (1S)	$b\bar{b}$	9460,3	1^-	0	0

Tab. 1.3: Mesonen aus Abbildung 1.4 und ihre Zusammensetzung. Zusätzlich sind noch Masse, Drehimpuls und Parität, Ladung Q und Strangeness S aufgeführt. Da J/Ψ und Υ im ALICE-Experiment entstehen und vermessen werden, sind diese hier ebenfalls aufgeführt. [3]

Zusätzlich zu den hier genannten Baryonen und Mesonen existieren noch Teilchen, die auch in Kombinationen mit den weiteren Quark-Falvors gebildet werden. Die Hilfsquantenzahlen der Baryonen und Mesonen werden dann, außer um die Strangeness, noch um die Hilfsquantenzahlen Charm für c-Quarks, Truth für t-Quarks und Beauty für b-Quarks erweitert. Außerdem existieren zu fast jedem Meson und Baryon noch höherenergetische Resonanzen bei anderen Spins und Paritäten.

2 Large Hadron Collider und ALICE-Übergangsstrahlungsdetektor

2.1 Der Large Hadron Collider

Der Large Hadron Collider (LHC) befindet sich in der Nähe von Genf, sowohl auf schweizerischem als auch auf französischem Staatsgebiet in bis zu 100 Metern Tiefe. Der LHC ist ein ringförmiger Teilchenbeschleuniger mit einem Umfang von nahezu 27 km, in dem Hadronen aus zwei beschleunigten Strahlen, die sich gegenläufig bewegen, zur Kollision gebracht werden. Bei den beschleunigten Kernen kann es sich um Protonen oder um Blei-Kerne handeln. Im beschleunigten Zustand haben die Protonen eine Energie von 7 TeV, die Bleikerne eine Energie im Schwerpunkt von bis zu 1146 TeV. Die Protonkollisionen werden vor allem in den Detektoren ATLAS, CMS, LHCb, LHCf und TOTEM untersucht, während der ALICE-Detektor speziell für Blei-Blei-Kollisionen entwickelt und gebaut wurde, die Protonkollisionen dienen hier in erster Linie als Vergleichsmessung.

Ziele des LHC sind die Untersuchung von Higgs- und supersymmetrischen Teilchen und der Struktur von Hadronen. Die Hadronstruktur wird durch das bei der Kollision entstehende Plasma, das Quarks und Gluonen (Partonen) enthält und in ähnlicher Form auch kurz nach dem Urknall das frühe Universum ausfüllte, erforscht. Durch die Neuordnung der Quarks und Gluonen entstehen weitere vielfältige Teilchen, die sich durch den Zerfall und teilweise auch direkt nachweisen lassen. Man hofft, in diesen Kollisions- und Zerfallsreaktionen neue Teilchen zu entdecken, hauptsächlich das durch das Standardmodell postulierte Higgs-Boson. Zur präzisen Untersuchung der gegebenenfalls neu entdeckten Teilchen ist zusätzlich zum LHC der Leptonenbeschleuniger ILC (International Linear Collider) geplant. Die Fertigstellung ist nicht vor 2019 zu erwarten.

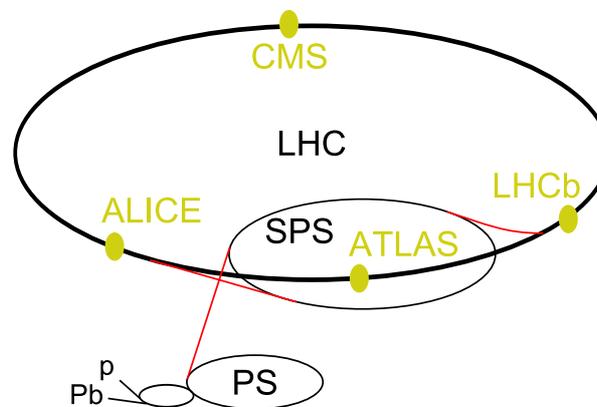


Abb. 2.1: Der LHC in der Übersicht mit seinen Vorbeschleunigerringen, dem Proton Synchrotron (PS) und dem Super Proton Synchrotron (SPS), sowie den vier großen Teilchendetektoren ATLAS, ALICE, CMS und LHCb. [7]

Weitere Ziele, die man mit dem LHC verfolgt, ist die Frage nach der Vereinheitlichung der Grundkräfte durch die Suche nach supersymmetrischen Teilchen in CMS und ATLAS; die Suche nach der Dunklen Materie; die Erweiterung des Standardmodells um weitere bisher wegen ihrer Größe unentdeckter Raumdimensionen durch Graviton-Wechselwirkungen und kurzlebige schwarze Löcher; sowie die Erforschung der Materie-Antimaterie-Asymmetrie in unserem Universum. Letztendlich wird der LHC verwendet, um ungeklärten Fragen der Physik nachzugehen, und um bekannte Teilchen weiter zu vermessen. Diese Präzisionsmessungen helfen, die derzeit aktuellen Theorien weiter zu entwickeln und zu testen. Als Beispiel sei hier die Vermessung der in hoher Anzahl im LHC entstehenden Top-Quarks und das bei der Kollision von Bleikernen entstehenden Quark-Gluon-Plasmas (QGP) erwähnt.

2.1.1 Atlas - A Toroidal LHC Apparatus

Der ATLAS-Detektor ist als Universaldetektor ausgelegt, um möglichst viele entstehende Teilchen nachweisen zu können. Vorrangige Ziele des ATLAS-Detektors ist vor allem die Suche nach zusätzlichen Dimensionen, dem Higgs-Boson und

den Teilchen, die für Dunkle Materie verantwortlich sind. Obwohl ATLAS und CMS dafür ausgelegt sind, die gleichen Teilchen identifizieren zu können, unterscheiden sie sich dennoch grundlegend. Das Hauptmerkmal des ATLAS-Detektors ist der torusförmige Hauptmagnet mit einem Durchmesser von 25 Metern um das Strahlrohr (siehe Abbildung 2.2). Der Detektor ist 46 Meter lang und hat eine Breite und Höhe von jeweils 25 Metern bei einem Gewicht von 7000 Tonnen. Damit hat ATLAS das weltweit größte Detektorvolumen.

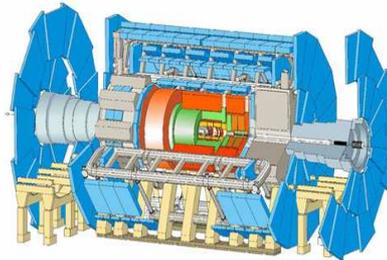


Abb. 2.2: Das ATLAS-Experiment [8]

2.1.2 CMS - Compact Muon Solenoid

Mit dem CMS-Detektor (Abbildung 2.3) werden die gleichen wissenschaftlichen Ziele wie mit dem ATLAS-Detektor verfolgt, die Konstruktion des Detektors ist aber eine Andere. Sie unterscheidet sich vor allem im Aufbau des Magnet-systems von ATLAS. Der Hauptbestandteil von CMS ist der größte je gebaute supraleitende Elektromagnet mit einer Feldstärke von bis zu 4 Tesla und einer maximalen Stromstärke von 20000 Ampere. Hauptsächlich werden in CMS Myonen untersucht, da eines der Higgs-Teilchen über einen 4-Myonen-Kanal zerfällt. Die vielen Absorber verursachen das hohe Gewicht von CMS, das 12500 Tonnen beträgt. CMS ist 21 Meter lang und hat eine Höhe und Breite von jeweils 15 Metern. Eine weitere Besonderheit von CMS ist, dass der Detektor nicht an Ort und Stelle im Untergrund gebaut wurde, sondern zunächst an der Oberfläche gebaut, dann demontiert und am endgültigen Platz unter der Oberfläche wieder zusammengesetzt wurde.

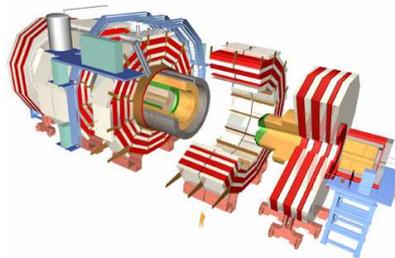


Abb. 2.3: Das CMS-Experiment [9]

2.1.3 LHCb - Large Hadron Collider beauty

Der LHCb-Detektor hat die Hauptaufgabe, die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie in unserem Universum zu untersuchen. Dafür konzentriert sich LHCb auf einen ganz speziellen Quark-Flavour, die Beauty-Quarks (auch Bottom-Quark genannt). Im Gegensatz zu den anderen bisher vorgestellten Detektoren, umschließt LHCb den Kollisionsspunkt nicht. Die Subdetektoren befinden sich über eine Länge von 20 Metern entlang der Strahlachse vom Kollisionsspunkt entfernt. Der LHCb ist 21 Meter lang, 10 Meter hoch, 13 Meter breit und wiegt 5600 Tonnen.

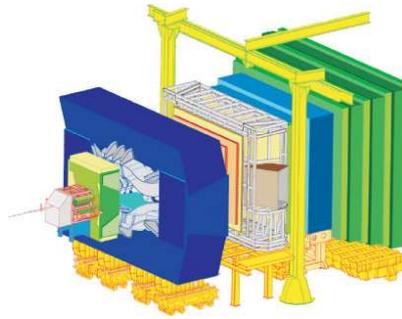


Abb. 2.4: Das LHCb-Experiment [10]

2.1.4 ALICE - A Large Ion Collider Experiment

Die Aufgabe des ALICE-Detektors ist es, die Zustände kurz nach dem Urknall nachzustellen und zu untersuchen. Dazu werden innerhalb des Detektors Bleikerne zur Kollision gebracht, wodurch im Inneren Temperaturen entstehen, die 100000 Mal heißer sind, als das Innere der Sonne. Unter diesen Umständen erwartet man, dass die Protonen und Neutronen aus den Bleikernen "aufschmelzen" und das so entstandene Quark-Gluon-Plasma untersucht werden kann. Dazu stehen mehrere verschiedene Subdetektoren zur Verfügung, die jetzt von Innen nach Außen vorgestellt werden. Die meiste Aufmerksamkeit wird in dieser Arbeit dem Übergangsstrahlungsdetektor (Transition Radiation Detektor, TRD) zugewandt werden. ALICE ist 20 Meter lang, jeweils 16 Meter breit und hoch und wiegt 10000 Tonnen. Abbildung 2.5 zeigt den ALICE-Detektor mit seinen Subdetektoren. [11]

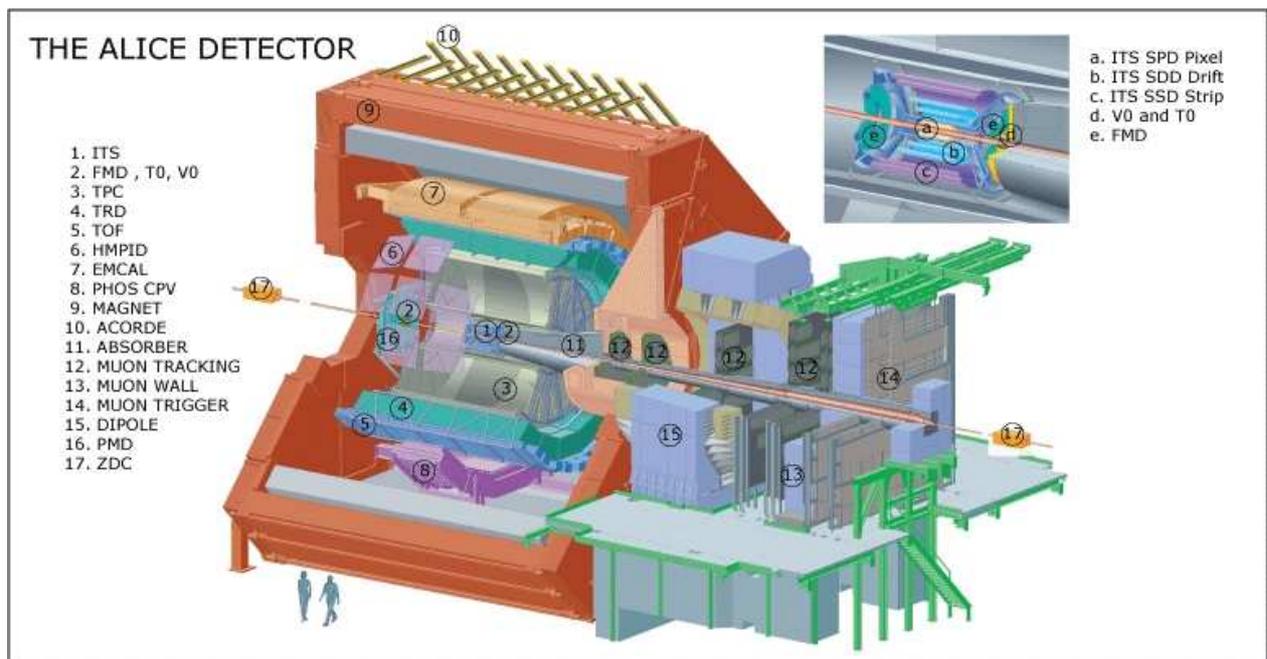


Abb. 2.5: Das ALICE-Experiment mit seinen Subdetektoren [12]

ITS - Inner Tracking System

Das ITS besteht aus sechs zylindrisch um den Strahl angeordneten Silizium-Detektorlagen (siehe Abbildung 2.5 Nr. 1 sowie a-c). Diese bestehen zunächst aus zwei Lagen des Silicon Pixel Detectors (SPD), gefolgt von zwei Lagen des Silicon Drift Detectors (SDD) und abgeschlossen durch zwei weitere Detektorlagen des Silicon Strip Detector (SSD). Aufgabe des ITS ist es, den Kollisionspunkt und die sekundären Vertices für die Rekonstruktion der Charm- und Hyperon-Zerfälle mit hoher Genauigkeit zu bestimmen, Partikel mit geringem Impuls zu verfolgen und zu identifizieren, sowie die Impulsmessungen der TPC zu unterstützen. [13]

TPC - Time Projection Chamber

Die Zeitprojektionskammer ist der maßgebliche Detektor zur Teilchenspurverfolgung (siehe Abbildung 2.5 Nr. 3) und arbeitet mit einem Zählgasgemisch aus Neon, Kohlendioxid und Stickstoff. Über die Messungen der Hadronen werden durch die TPC Informationen über die Zusammensetzung der Quark-Flavours am Kollisionspunkt erhalten. Zusammen mit dem Übergangsstrahlungsdetektor und dem Inner Tracking System wird die TPC auch zur Untersuchung von Vektor-Meson-Resonanzen, Charm- und Beauty-Hadronen verwendet. Dies passiert durch die Messung und Untersuchung von Leptonen. Zur Identifikation von Teilchen wird das gute Auflösungsvermögen der TPC in Bezug auf den Impuls- und Energieverlust für Elektronen und Hadronen zu Nutze gemacht. [14]

TRD - Transition Radiation Detector

Da der Übergangsstrahlungsdetektor den Hauptbestandteil dieser Arbeit darstellt, wird in den weiteren Kapiteln näher auf diesen Subdetektor eingegangen. Der Übergangsstrahlungsdetektor ist in Abbildung 2.5 unter der Nr. 4 eingezeichnet.

TOF - Time Of Flight

Der Flugzeit-Detektor dient ALICE dazu, geladene Partikel mit intermediärem Impuls zu identifizieren. Die Zeitauflösung von 100 ps wird 3σ Pion/Kaon-Unterscheidungen bis 2,2 GeV/c und Kaon-Proton-Unterscheidungen bis 4 GeV/c ermöglichen. Weitere Ziele sind, die QCD-Thermodynamik über Pion-, Kaon- und Protonimpulsverteilungen zu untersuchen und Signaturen der QGP-Formationen über Open Charm- und Phi-Meson-Produktionen zu bestimmen. Der Flugzeitdetektor arbeitet hierzu mit Vielspaltwiderstandsplattenkammern (Multigap Resistive Plate Chambers, MRPC). Der Flugzeitdetektor befindet sich in Abbildung 2.5 unter der Nr. 5. [15]

HMPID - High Momentum Particle Identification

Der HMPID ist ein Cherenkov-Detektor und sein Meßbereich schließt an die anderen Detektoren an. In diesem Detektor kommt perfluoriertes Hexan (C_6F_{14}) zum Einsatz, ein starkes Treibhausgas, das aber auch experimentell zur Behandlung von Verbrennungsoferten verwendet wird, indem es als Gas oder Flüssigkeit in die Lunge des Patienten geleitet wird. Die durch den Cherenkov-Effekt entstehende Strahlung im UV-Bereich wird durch Vieldrahtproportionalkammern (Multi Wire Proportional Chamber, MWPC) gemessen (siehe Abbildung 2.5 Nr. 6). Dieser Detektor ist vor allem für Pionen, Kaonen und Protonen im Impulsbereich von 1-5 GeV/c geeignet. [16]

PHOS - Photon Spectrometer

Das ALICE Photonenspektrometer ist ein hochauflösendes EM-Kalorimeter, das aus Blei-Wolfram-Kristallen ($PbWO_4$) mit jeweils einer PIN-Fotodiode (positive intrinsic negative diode) besteht (siehe Abbildung 2.5 Nr. 8). Das Photonenspektrometer ist vor allem dazu ausgelegt, primäre Photonen aus der Kollision zu messen ($\sim 0.5-10$ GeV/c), kann aber auch sekundäre Photonen aus Teilchenzerfällen registrieren. Ferner können auch π^0 ($\sim 1-10$ GeV/c) und η -Mesonen ($\sim 2-10$ GeV/c) vermessen werden, Messungen an Teilchen mit höherem Impuls sind auch möglich. Außerdem wird PHOS zum Detektieren von Signalen der wiederhergestellten chiralen Symmetrie benutzt. [17]

Myon Spectrometer

Das Myon-Spektrometer stellt insofern eine Besonderheit im ALICE-Detektor dar, als dass es nicht wie die bisher beschriebenen Subdetektoren in multiplen Schichten über dem Kollisionspunkt angebracht ist, sondern sich hinter den anderen Detektoren, abgeschirmt durch einen Absorber, in Strahlrichtung befindet. Hier finden die Messungen schwerer Quarkonia (J/Ψ , Ψ' , Υ , Υ' , Υ'') statt, die durch einen $\mu^+\mu^-$ -Kanal zerfallen und so Myonenpaare erzeugen. Die invariante Massenauflösung erstreckt sich dabei von 70 MeV in der J/Ψ -Region bis 100 MeV im Υ -Bereich. Der erwähnte Absorber filtert die für dieses Experiment unerwünschten Teilchen (Hadronen) heraus und die verbleibenden Myonen durchlaufen danach eine Reihe von Spurkammern und zwei Dipol-Magneten, die positiv und negativ geladene Myonen trennen. Abschließend sind an diesem Detektor noch Triggerkammern angebracht, die für Koinzidenzmessungen verwendet werden (siehe Abbildung 2.5 Nr. 11-15). [18]

PMD - Photon Multiplicity Detector

Der PMD befindet sich gegenüber des Myon-Spektrometers auf der anderen Seite von ALICE (Abbildung 2.5 Nr. 16). Dieser Detektor soll die räumliche Verteilung von Photonen und ihre Multiplizität messen und so Aufschlüsse über Ereignisse und Fluktuationen in Vorwärtsrichtung liefern, wo durch die hohe Teilchendichte ein Einsatz von Kalorimetern nicht möglich ist. [19]

ZDC - Zero Degree Calorimeter

Das zweiteilige Zero-Degree-Calorimeter befindet sich jeweils in ca. 115 Meter Entfernung beidseitig des Kollisionspunktes (Abbildung 2.5 Nr. 17) und wird verwendet, um festzustellen, inwiefern die zu untersuchende Kollision zentral war, also ob die beschleunigten Teilchen frontal aufeinander geprallt sind oder sich nur gestreift haben. Bei peripheren Kollisionen bleiben Stücke des ursprünglichen Nukleons übrig und bewegen sich weiter in Strahlrichtung. Da die Energie vor der Kollision bekannt war, misst das ZDC die Energie nach der Kollision und dadurch kann auf die Größe des verbliebenen Fragments, die Zentralität der Kollision und die Auswertungsmöglichkeiten geschlossen werden. Dieser Detektor gehört zum Triggersystem. [20]

EMCAL - Electromagnetic Calorimeter

Das EMCAL erweitert die Messmöglichkeiten von ALICE auf hochenergetische Teilchenjets (Schauer von Teilchen aus der Kollision zweier Kerne). Diese Jets beinhalten Informationen über die frühen Phasen des Kollisionsevents. Weiterhin wird die Möglichkeit gegeben, auf diese hochenergetischen Jets zu triggern und so die Auflösung zu verbessern. Die Auflösung des EMCAL für geladene Partikel reicht von 100 MeV/c bis 100 GeV/c. EMCAL ist in Abbildung 2.5 unter der Nr. 7 zu erkennen. [21]

Forward Multiplicity Detector (FMD), V0- und T0-Detektoren

Die drei Detektoren FMD, V0 und T0 (Abbildung 2.5 Nr. 2, bzw. d und e) dienen als Ersatz zu einem einzelnen Detektor in Vorwärtsrichtung und sind nahe dem Kollisionspunkt in Strahlnähe angebracht. Der T0-Detektor liefert zeitlich schnelle Signale, die als Level-0-Trigger für die ALICE-Triggerecke dienen und außerdem dem TRD als Pretrigger und der TOF als Referenzzeitsignal zur Verfügung gestellt werden. Der V0-Detektor dient den zentralen Detektoren als Trigger und übernimmt für das Myon Spektrometer die Untergrundunterdrückung. Der FMD stellt Informationen über die Multiplizität bereit und wird zur Messung von Fluktuationen in der Multiplizität genutzt. Die Auslesezeit ist mit $\sim 13 \mu\text{s}$ recht langsam, daher ist dieser Detektor nur als Trigger der Stufe 2 oder höher geeignet. [22]

2.1.5 Kleinere Experimente: LHCf und TOTEM

Die bei den Kollisionen entstehenden Teilchen-Kaskaden gleichen den Reaktionen der Kosmischen Strahlung und werden vom LHCf-Detektor (Large Hadron Collider forward) untersucht. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sollen dazu dienen, große Experimente über kosmische Strahlung zu kalibrieren, um so größere Flächen abzudecken. Die Ausmaße des LHCf sind im Gegensatz zu den anderen Detektoren eher gering. Jeder Teil des aus zwei Wolfram-Kalorimetern bestehenden Detektorpaares ist bei einem Gewicht von 40 Kilogramm 30 Zentimeter lang, 80 Zentimeter hoch und 10 Zentimeter breit. [23]

Um die Bereiche der Physik abzudecken, die von den anderen Detektoren nicht erfasst werden können, gibt es den TOTEM-Detektor (Total elastic and diffractive cross-section measurement). Dieser Detektor vermisst die Größe des Protons neu und überwacht auch die Luminosität des LHC. Dazu werden durch mit dem Strahlrohr verbundene Kammern (Roman Pots) nahe des LHC-Strahls entstehende Teilchen untersucht. Die acht Roman Pots sind immer paarweise in der Nähe des CMS-Kollisionspunktes platziert. TOTEM erstreckt sich über 440 Meter, ist jeweils 5 Meter hoch und breit und wiegt 20 Tonnen. [24]

2.2 Der ALICE-Übergangsstrahlungsdetektor

Der Übergangsstrahlungsdetektor des ALICE-Experiments erlaubt die genauere Untersuchung der Physik von Elektronenpaaren sowie die Untersuchung von Open Charm und Open Beauty, entstanden durch Kern-Kern-Kollisionen. Zusammen mit der ALICE-TPC und dem ALICE-ITS wird eine genauere Identifikation von Elektronen und damit, über den

Di-Elektronen-Kanal, eine Messung von leichten und schweren Vektor-Meson-Resonanzen bei Blei-Blei-Kollisionen erfolgen. Ferner kann die genaue Identifikation der Elektronen bei hohen transversalen Impulsen ($p_t > 1 \text{ GeV}/c$) in Verbindung mit dem ITS dazu benutzt werden, die Gesamtproduktion von Open Charm und Open Beauty in der Kollision zu bestimmen.

Mit einer ähnlichen Vorgehensweise können direkt bei der Kollision entstandene J/Ψ -Mesonen von solchen unterschieden werden, die durch Beauty-Zerfall entstanden sind. Durch die hohe Tracking-Geschwindigkeit des TRD kann der TRD als Trigger für Elektronen mit hohem transversalem Impuls dienen, welcher dann zur Steigerung der Ausbeute der Messungen des Υ -Teilchens, sowie der Verfeinerung der Messungen des massereichen Teils des Di-Leptonen-Kontinuums und der J/Ψ -Detektion bei hohen transversalen Impulsen benötigt wird. [25]

2.2.1 Theoretische Grundlagen der Übergangsstrahlung

In der klassischen Betrachtung emittiert ein geladenes, geradlinig und gleichförmig bewegtes Teilchen im Vakuum keinerlei Strahlung. Bewegt sich das Teilchen allerdings durch ein Medium und übersteigt seine Geschwindigkeit die der Phasengeschwindigkeit des Lichts in selbigem Medium, kann man eine Strahlungsemission beobachten. Diese Strahlung wird *Cherenkov-Strahlung* genannt und tritt unter dem charakteristischen Winkel

$$\Theta_c = \arccos\left(\beta\epsilon^{\frac{1}{2}}\right)^{-1} \quad (2.1)$$

auf. Hierbei ist ϵ die materialspezifische Dielektrizitätszahl und β das Verhältnis von Teilchengeschwindigkeit zur Lichtgeschwindigkeit ($\beta = \frac{v}{c}$).

Eine weitere Form der Strahlung, die ein geladenes bewegtes Teilchen in einem Medium verursachen kann, ist die *Übergangsstrahlung*, die bei einem Wechsel des Teilchens von einem Medium in ein anderes auftritt. Diese beim Übergang in ein anderes Medium entstehende Strahlung wird durch eine Umordnung der Felder, die das Teilchen in den Medien begleiten, erzeugt. Befindet sich das Teilchen tief im Inneren des ersten Mediums, so wird es von Feldern umgeben, die von den Eigenschaften des Teilchens, seiner Bewegung und den dielektrischen Eigenschaften des Mediums abhängen. Gleiches gilt, wenn sich das Teilchen tief im Inneren des zweiten Mediums befindet. Während der Annäherung an die Grenze des umgebenden Mediums findet ein Umordnungsprozess statt, infolgedessen Teile des Feldes als Strahlung emittiert werden.

Die Intensität der emittierten Übergangsstrahlung, die ein Teilchen mit der Geschwindigkeit $v = \beta c$ und der Ladung ze beim Übergang vom Vakuum in ein dielektrisches Medium mit dem Brechungsindex $n(\omega)$ erzeugt, ergibt sich nach [26] durch

$$\begin{aligned} I &= \int_0^\infty \frac{dI}{dv} dv \\ &= \frac{z^2 e^2 \gamma \omega_p}{3c} \\ &= \frac{z^2 \alpha}{3} \gamma \hbar \omega_p \quad . \end{aligned} \quad (2.2)$$

Hierbei beschreibt α die elektromagnetische Kopplungskonstante $\alpha = \frac{1}{137}$, γ ist der relativistische Lorentzfaktor $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}} = \frac{E}{mc^2}$ und ω_p die materialspezifische Plasmafrequenz

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad . \quad (2.3)$$

Es sind n_e die Elektronendichte des Mediums, m_e die Elektronenmasse und ϵ_0 die elektrische Feldkonstante¹. Über den Lorentzfaktor lässt sich nun das Teilchen identifizieren und eine Energiemessung im Hochenergiebereich durchführen, wo sonst keine weiteren Möglichkeiten zur Verfügung stehen. So lassen sich Teilchen mit gleichem Impuls aber verschiedener Masse voneinander unterscheiden. Der Faktor $\frac{\alpha}{3}$ der Gleichung 2.2 zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit energiereiche Photonen bei nur einem einzigen Grenzflächendurchgang zu erhalten sehr gering ist. Daher ist es geeigneter, eine Schicht mit mehreren Folienübergängen zu verwenden, die voneinander durch einen Zwischenraum getrennt sind. Hier emittiert das Teilchen bei einer sehr dünnen Folie die zweifache Intensität an Übergangsstrahlung, da sowohl beim Eintritt in die Folie, als auch beim Austritt aus der Folie Übergangsstrahlung freigesetzt wird.

¹ elektrische Feldkonstante $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$

2.2.2 Aufbau des Detektorkörpers

Der ALICE-Übergangsstrahlungsdetektor besteht aus insgesamt 540 voneinander unabhängigen Detektoreinheiten, die, jede für sich, schon einen eigenen Übergangsstrahlungsdetektor bilden. Diese 540 Einheiten sind Vieldrahtkammern, die zusätzlich im Inneren mit einer Sandwich-Struktur von Radiatoren ausgestattet sind, und bei deren Durchgang Elektronen Übergangsstrahlung emittieren [27]. Jeweils 30 Vieldrahtkammern sind somit in insgesamt 18 Supermodule gegliedert (SM 00 bis SM 17), welche wiederum in sechs Lagen (Layer 0 bis 5) unterteilt sind. Innerhalb jeder Lage befinden sich fünf Kammern, die, mit Ausnahme der mittleren Kammer, gleich groß sind (die mittlere Kammer ist kleiner als die anderen). Die Kammern der verschiedenen Lagen haben eine zueinander verschiedene Größe, die kleinsten Kammern sind die Kammern des Layers 0, die größten Kammern befinden sich in Layer 5.

Die Kammern der einzelnen Lagen bilden so jeweils konzentrische Kreise um das Strahlrohr und gewährleisten das vollständige Einschließen des Strahlrohres und der unteren Detektoren ITS und TPC. Die mittlere Kammer einer jeden Lage in einem Supermodul ist eine sogenannte C0-Kammer und ist im Layout kleiner gehalten als die anderen Kammern der entsprechenden Lage (siehe Abbildung 2.7, die gelben Kammern sind C0-Kammern). Auf ihr befinden sich nur sechs Readout-Boards (ROBs), während sich auf den anderen Kammern, den C1-Kammern, acht Readout-Boards befinden. Eine schematische Darstellung zum Aufbau des Detektors findet sich in Abbildung 2.6.

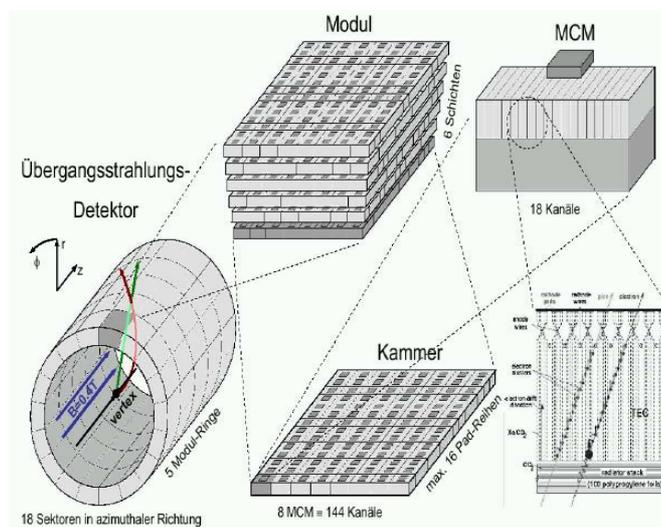


Abb. 2.6: Schematische Darstellung des Aufbaus des Übergangsstrahlungsdetektors. [28]

Kammerkörper

Jede Readout-Kammer besteht zunächst aus einem Radiator-Sandwich von 4,8 cm Dicke, gefolgt von einer Vieldraht-Driftkammer. Das Signal, das auf den Kathoden-Pads, die sich auf der anderen Seite des Driftbereiches befinden, induziert wird, wird von der Elektronik auf der Kammeroberfläche ausgelesen. Jede Kammer besitzt 144 Pads in Φ -Richtung und 12 (C0-Kammer) oder 16 (C1-Kammer) Pad-Reihen in Z-Richtung. Ein Pad hat eine typische Fläche von 6-7 cm² und insgesamt decken alle Pads aller Kammern eine Fläche von 736 m² mit $1,16 \times 10^6$ Auslesekanälen ab. Das auf der Kathodendrahtebene induzierte Signal wird in Zeitintervallen (Timebins genannt) mit einer Länge von 100 ns gesammelt. Als Detektorgas wird im ALICE-Übergangsstrahlungsdetektor ein Gemisch aus Xenon und Kohlendioxid im Verhältnis 85:15 verwendet. Das gesamte Gasvolumen im Detektor beträgt 27,2 m³. [30]

Die Arbeitsweise einer TRD-Kammer ist in Abbildung 2.8 skizziert: Der linke Teil der Abbildung zeigt die Durchgänge eines Pions und eines Elektrons durch die Vieldrahtkammer, senkrecht zu den Drähten. Elektronen, die durch die Übergangsstrahlung oder den Energieverlust durch Gasionisation entstanden sind, bewegen sich an den Feldlinien entlang zur Anodendrahtebene. Weiterhin ist erkennbar, dass Pionen nur in der Vieldrahtkammer freie sekundäre Elektronen verursachen, während primäre Elektronen beim Durchgang durch den Radiator zusätzlich Übergangsstrahlung emittieren.

Der rechte Teil der Grafik zeigt eine Projektion der Ablenkungsebene des magnetischen Feldes von ALICE. In diese Richtung sind die Kathoden-Pads in eine Breite von 0,635 bis 0,785 cm eingeteilt. Eingefügt ist hier noch eine Darstellung der Signalstärke über Pads und Timebins einer gemessenen Elektronenspur, die die Driftregion eines Elektrons aufspannen.

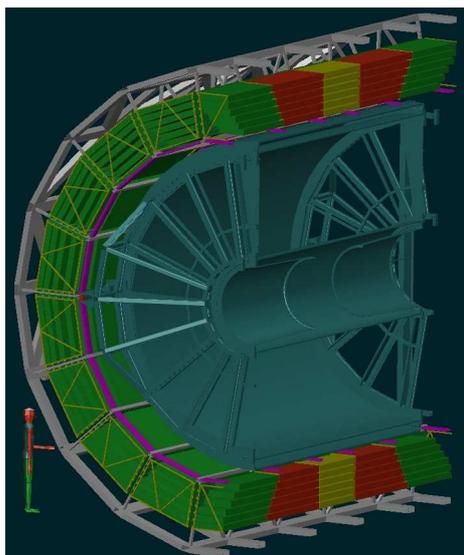


Abb. 2.7: Querschnitt durch ALICE, der Übergangsstrahlungsdetektor befindet sich in Position. Die einzelnen Kammern sind nach Stacks (Spalten) farblich markiert, die gelben Kammern in der Mitte sind die kleineren C0-Kammern, grüne und rote Kammern sind C1-Kammern. [29]

Die Kaskade der Übergangsstrahlung trifft etwas später an der Anodendrahtebene ein als die durch Ionisation erzeugten Elektronen. Pionen und Elektronen sind so unterscheidbar (siehe Abbildung 2.9). [30], [31]

Front-End-Elektronik (Readout-Boards)

Auf die einzelnen Kammerkörper des Übergangsstrahlungsdetektors wird zur Datenverarbeitung eine Elektronik aufgebracht. Jede der Kammern wird dann entweder mit 6 (C0-Kammern) oder mit 8 (C1-Kammern) Platinen (Readout-Boards, ROBs) bestückt, die über Flachbandkabel mit den Pads der Vieldrahtkammer verbunden werden. Auf den Readout-Boards befinden sich jeweils 17 MCMs (multi chip modules), welche die aus dem Kammerinneren kommenden Signale aufarbeiten und zunächst board-weise im Boardmerger (BM) und dann auf jeder Kammerhälfte im Halfchambermerger (HCM) zusammenführen, sodass sie über das ORI (Optical Readout Interface) optisch ausgelesen werden können.

Die Readout-Boards haben alle grundsätzlich die Funktion, Daten aus den Kammern zu verarbeiten und im Boardmerger zusammen zu führen, mit einem jeweils an ihre Lage angepasstem Layout. Auf zwei der ROBs befindet sich zusätzlich je ein Halfchambermerger und ein ORI, auf einem anderen ROB ist das DCS-Board (Detector-Control-System) platziert, durch das die Readout-Boards gesteuert werden.

Die Elektronik der Kammer wird zusätzlich in weitere Einheiten unterteilt. Zum Einen ist das die Seite (A- oder B-Seite), die jeweils einen eigenen Halfchambermerger und ein eigenes ORI hat, und zum Anderen die Linkpairs (LP), die durch zwei gegenüberliegende Readout-Boards auf der A- und B-Seite gebildet werden. Diese Einteilungen haben hauptsächlich technische Gründe, da zum Beispiel die MCMs auf einem Linkpair zusammen einen geschlossenen Kreis bilden, in dem die Daten übermittelt werden oder die ORIs jeweils nur eine Seite der Kammer auslesen können.

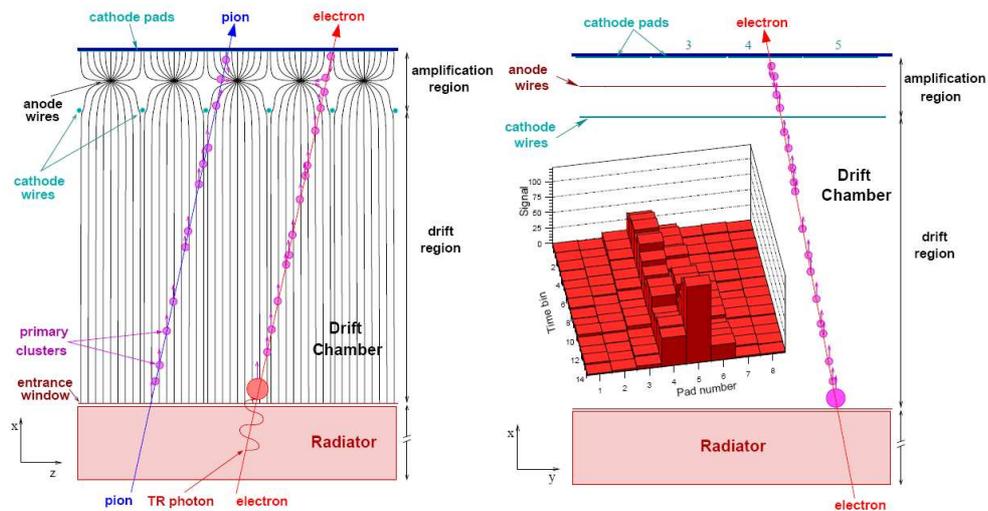


Abb. 2.8: Funktionsweise des ALICE-TRD. Auf der linken Seite der Abbildung ist zu erkennen, wo der Unterschied beim Durchgang von Elektronen und Pionen durch den TRD liegt: Pionen verursachen nur in der Vieldrahtproportionalkammer Elektronen, während beim Durchgang der Elektronen zusätzlich Übergangstrahlung emittiert wird. Rechts ist eine Projektion der Ablenkungsebene des magnetischen Feldes gezeigt, eingefügt ist die Darstellung der Signalstärke über die Pads und Timebins einer Elektronenspur zu sehen. [29]

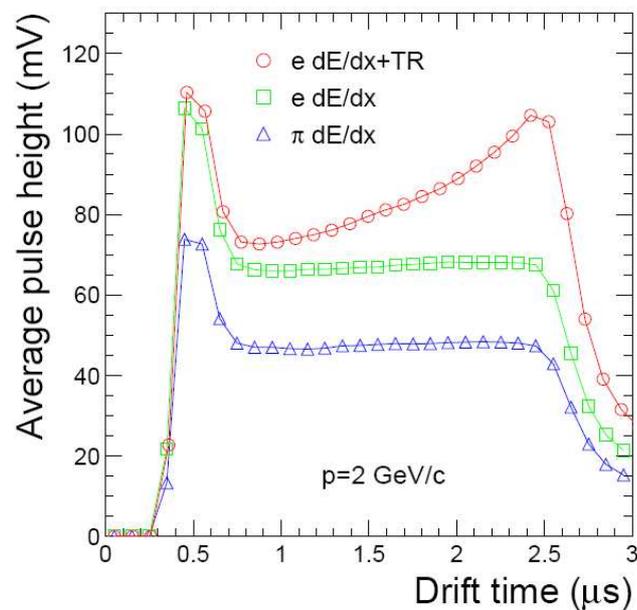


Abb. 2.9: Signalhöhe aufgetragen über Driftzeit: Der Unterschied zwischen Teilchen, die Übergangstrahlung erzeugen, und jenen, die keine Übergangstrahlung verursachen, kann an der durch die Absorption der Übergangstrahlung erhöhten Signalstärke und der verlängerten Driftzeit erkannt werden. [30]

3 Kammerbau und Auswertung der Kammertests

Im Zeitraum dieser Arbeit wurden insgesamt 13 neue L5C1-Kammern der Supermodule VIII , XI, X (jeweils vier Kammern) sowie eine Spare-Kammer für den ALICE-Übergangsstrahlungsdetektor an der GSI gebaut und getestet. Dieses Kapitel geht kurz auf die Elektronikintegration und die Kammertests ein und soll Aufschluss über die Qualität der Kammern im Bezug auf die Elektronik einerseits und das Rauschverhalten andererseits geben. Für das Rauschverhalten wurde dazu eine Reihe von Statistiken erstellt, die die Signalverteilung im Mean und im RMS zeigen.

Supermodul	SM VIII	SM IX	SM X	Spare
Kammern	L5C1 075	L5C1 024	L5C1 043	L5C1 048
	L5C1 046	L5C1 055	L5C1 016	
	L5C1 057	L5C1 037	L5C1 066	
	L5C1 068	L5C1 064	L5C1 040	

Tab. 3.1: Übersicht über alle im Zeitraum dieser Arbeit gebauten Kammern. Die aufgeführte Reihenfolge entspricht der Bau-reihenfolge, abgesehen von der Spare-Kammer, welche zwischen SM VIII und SM IX angefertigt wurde.

3.1 Elektronikintegration

Bevor die Elektronikboards auf eine Auslesekommer aufgebracht werden können, bedarf es einiger Vorbereitungen. Zunächst muss die Kammer genauestens auf mögliche sichtbare Beschädigungen überprüft werden. Im Anschluss daran wird die Kammeroberfläche gründlich gereinigt und eine Schaumstoffolie an den Stellen aufgeklebt, über denen sich später die MCMs der Readout-Boards befinden. Außerdem müssen die Signalkabel der Kammer so umgebogen werden, dass sie sich später leicht in die Aufnahmen der ROBs einführen lassen.

Sind alle Vorbereitungen abgeschlossen, werden nacheinander die acht Readout-Boards (bei C1-Kammern), die ORI-Boards und das DCS-Board angebracht, die Signalkabel in die entsprechenden Aufnahmen eingeführt und verriegelt und die Readout-Boards verschraubt. Abschließend werden die ROBs mit Kabelbrücken untereinander verbunden, mit Kupferband verlötet und über Verbindungen des Kupferbandes mit dem Kammerkörper geerdet.

Als nächstes wird ein Testzyklus gestartet und sobald dieser bestanden wurde, wird die Elektronik zusätzlich mit einer Kühlung versehen, die eine ausreichende Wärmeabfuhr im späteren Betrieb gewährleistet. Diese Kühlrohre bestehen aus Aluminium und werden mit einem wärmeleitenden Silikonkleber auf den MCMs, den Spannungswandlern, dem DCS-Board und den ORI-Boards verklebt, sowie mit einem 2-Komponenten-Kunstharz auf den Platinen fixiert. Die Kammer wird nun dem finalen Testzyklus unterzogen. Bilder der hier beschriebenen Elektronik finden sich im Anhang A. Eine Ausführliche Beschreibung der Elektronikintegration und der Kammertests findet sich in [32].

3.2 Kammertests

Die Kammertests sind notwendig, um die Funktionsfähigkeit der Kammer zu prüfen und eventuelle Fehler in der Elektronik aufzudecken. Der zweite Testzyklus dient dazu, eventuelle Kurzschlüsse, die durch das Aufkleben der Kühlung entstanden sein können, auszuschließen. Die Tests bestehen im Groben aus drei Bereichen, den Skript-Tests, welche auf einem Linux-Shell-Skript bestehen, den CE-Tests, die die Control-Engine des DCS-Boards verwenden und den Tests zur Messung des Rauschverhaltens der Kammer in verschiedenen Konfigurationen (NF: No Filter; P: Pedestal-Filter; PGT: Pedestal- und Gain-Filter, sowie Tail-Cancellation).

Der genaue Testzyklus besteht aus den in Tabelle 3.2 aufgelisteten Tests, die spaltenweise von links nach rechts ausgeführt werden. Die Reihenfolge ist nicht bindend, aber sinnvoll, da bestehende Fehler sich auf alle anderen Tests auswirken können. Diese Reihenfolge bewirkt, dass Fehler frühzeitig erkannt werden und so das Auftreten von zweideutigen Testergebnissen minimiert wird.

Der Check-Laser-IDs und HCM2ORI2ACEX-Test sind hier Sonderfälle, da sie eigentlich nicht zu den CE-Tests bzw. zu den Tests des Rauschverhaltens zählen, jedoch in direktem Zusammenhang mit den Tests der jeweiligen Gruppe stehen.

Skript-Tests	CE-Tests	Rauschverhalten
Skript-Shutdown-Test	CE-Shutdown-Test	HCM2ORI2ACEX-Test
Skript-Reset-Test	CE-Reset-Test	Noise NF
	NI-Test	Noise P
	ORI-Test	Noise PGT
	Bridge-Test	Pulser P
	Read-Laser-IDs	Stresstest
	Check-Laser-IDs	
	DMM-Memory-Test	
	IMM-Memory-Test	
	DDD-Memory-Test	

Tab. 3.2: Reihenfolge der Kammertests. Die Tests werden Spaltenweise von links nach rechts ausgeführt. Der vollständige Testzyklus ist mit allen Skript-Befehlen im Anhang B nachzulesen.

Check-Lase-IDs gleicht die in Read-Laser-IDs ausgelesenen Werte mit den in den Datenbanken hinterlegten Werten ab, während HCM2ORI2ACEX die für die Rauschverhalten-Tests nötige Datenverarbeitungskette ab dem HCM testet.

Beispielhafte Plots zu den Messungen des Rauschverhaltens (Spare-Kammer L5C1 048) finden sich mit kurzen Erklärungen im Anhang C.1, die Plots des Rauschverhaltens der anderen gebauten Kammern sind im weiteren Anhang C aufgeführt. Die zum Testzyklus gehörigen Skript-Befehle sind in Anhang B nachzulesen.

3.3 Auswertung der Elektronik-Tests

Die Testzyklen, die die Qualität der Front-End-Elektronik testen, brachten bei den hier getesteten Kammern der Supermodule VIII, IX und X keine negativen Ergebnisse. Generell hat sich die Qualität der Elektronik gegenüber dem Supermodul I, welches im Zuge von [32] getestet wurde, stark verbessert.

In Shutdown- und Reset-Test wurden von den Testprogrammen keine Unregelmäßigkeiten festgestellt, genau wie in den NI-, ORI- und Bridge-Tests. Allerdings sind bei den NI-Tests die Kabelbrücken noch immer eine Schwachstelle. Bei vier Kammern musste, trotz einer vorherigen Untersuchung der verwendeten Kabelbrücken jeweils eine Kabelbrücke ausgetauscht werden. Hierbei handelte es sich um zwei 40polige Kabelbrücken des Typs 1 (CLK, PRE and DATA¹) und jeweils eine 16polige blaue (Typ 2, SCSN²) und eine grüne (Typ 1, PASA³) Kabelbrücke. Die vorherigen Tests dieser Kabelbrücken brachten eine Ausfallquote von ca. 30% bei den 40poligen Kabelbrücken des Typs 1.

In den folgenden Tests (Memory und Laser-IDs) zeigten sich auch weiterhin keine Auffälligkeiten, einige Einträge der Datenbank wurden durch die entsprechenden Laser-IDs der MCMs ergänzt, bzw. bei mehreren Möglichkeiten die richtige ID ausgewählt.

3.4 Auswertung der Messungen des Rauschverhaltens

Die getesteten Kammern legten im Allgemeinen bei den Tests ein recht gutes Rauschverhalten dar. Generell haben sich die Werte für das Rauschverhalten gegenüber den Kammern des getesteten Supermodul I [32] leicht erhöht. Vor allem im Bereich des DCS-Boards zeigte sich ein erhöhtes Rauschverhalten, das sich dann auch im Mittelwert für die gesamte Kammer bemerkbar macht. Die RMS-Werte dieser ROBs lagen bei einem Testlauf mit 100 Events zwischen 0,05 und 0,15 höher als die gegenüber liegenden Boards auf der A-Seite. Teilweise greift dieser Effekt sogar noch auf das ROB auf Position 0 über.

Die Signalverteilung im Mean (Abbildung 3.1) für die gebauten und getesteten Kammern ist unauffällig. Ohne Filter zeigt sich in der Addition der gesamten Kanäle aller gebauten und getesteten Kammern eine Gauss-Kurve mit einem Peak bei einer erwarteten Signalstärke von 49,9. Für die NF-Konfiguration ist das ein sehr guter Wert. Die in den weiteren Tests zugeschalteten Filter (Pedestal-Filter (P) sowie Pedestal- und Gain-Filter mit Tail-Cancellation (PGT)) bewirken eine Angleichung der Kanäle aneinander, bedingt durch die Baseline-Subtraktion des Pedestal-Filters. Der Gain-Filter, sowie

¹ CLK: CLock, ein Zeitsignal; PRE: PREtrigger; DATA: Daten

² SCSN: Slow Control Serial Network

³ PASA: Pre-Amplifier/ShAper, Vorverstärker und Former

die Tail-Cancellation, verursacht lediglich eine Verschiebung der Kurve in Richtung niedrigerer Werte. Die Mittelwerte betragen hier 9,65 für P- und 8,65 für PGT-Konfiguration.

Im Gegensatz zu den Histogrammen des Rauschverhaltens im Mean, verursachen die Filter beim Rauschverhalten im RMS auf den ersten Blick keine Änderungen. Schaut man aber genauer hin, kann man erkennen, dass sich im Vergleich der NF- und P-Konfiguration zur PGT-Konfiguration die Kurven leicht in Richtung höherer Werte verchoben haben. Das liegt an der Rechenleistung, die für die Anwendung der Filter zusätzlich zur normalen Rechenaktivität der MCMs aufgewendet werden muss. Die Werte von 1.19 in NF-Konfiguration, 1,18 P-Konfiguration und 1,41 in PGT-Konfiguration ist hier nicht außergewöhnlich. Die Werte von NF- und P-Konfiguration liegen im Normalfall sehr nahe beieinander, rein aus Erfahrungswerten liegt bei den Werten für eine einzelne Kammer der Wert für die Konfiguration ohne Filter unter dem Wert mit Pedestal-Filter, der Abstand zum Wert bei PGT-Konfiguration ist größer. Dieser Sachverhalt spiegelt sich in den Testergebnissen der Spare-Kammer L5C1 048 (Abbildungen C.1, C.2 und C.3) wider (RMS-Werte für diese Kammer: NF: 1,18; P: 1,19; und PGT: 1,39).

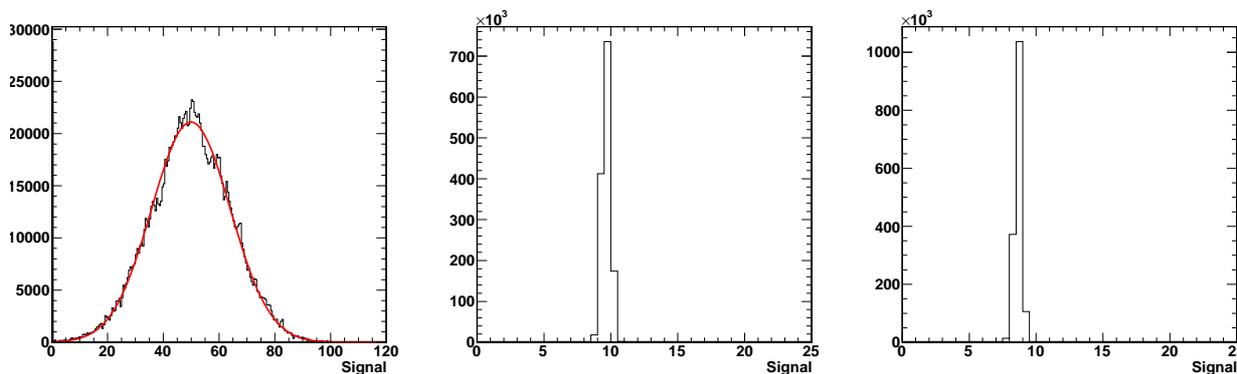


Abb. 3.1: Signalverteilung von Layer 5 der Supermodule VII, IX, X und der Spare-Kammer in NF- (links), P- (mitte) und PGT-Konfiguration (rechts) im Mean. Die NF-Konfiguration zeigt eine breite Streuung (Peak des Fits bei 49,9) in der Signalverteilung, während in P- und PGT-Konfiguration die Signale durch den Pedestal-Filter aneinander angeglichen wurden. Die Mittelwerte betragen hier 9,65 für P- und 8,65 für PGT-Konfiguration.

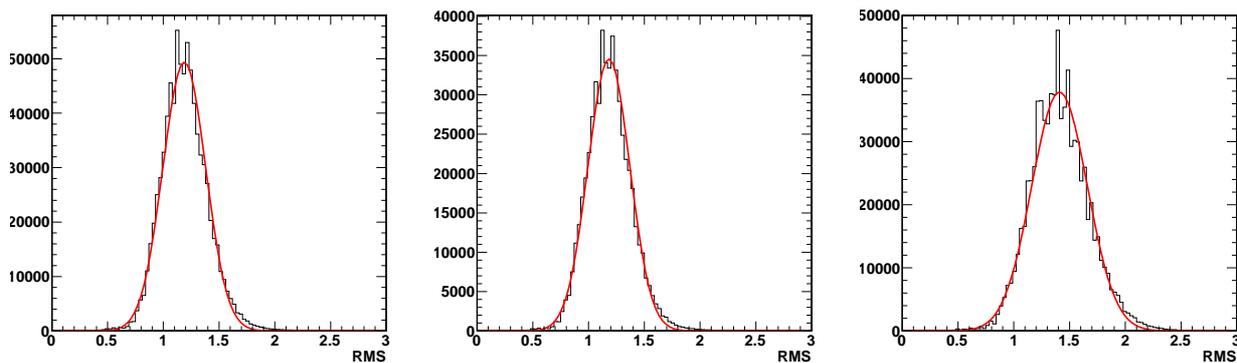


Abb. 3.2: Signalverteilung von Layer 5 der Supermodule VII, IX, X und der Spare-Kammer in NF- (links), P- (mitte) und PGT-Konfiguration (rechts) im RMS. Hier sieht man, dass die Filter lediglich den RMS-Wert leicht verschoben haben. An der Form der Verteilung haben die Filter hier kaum etwas geändert. Die Peaks spiegeln den Durchschnittlichen RMS-Wert der Kammern wider, die Werte liegen bei 1,19 in NF-, bei 1,18 in P- und bei 1,41 in PGT-Konfiguration.

Kammer	NF	P	PGT
SM VIII (Mittelwerte)	1,20	1,20	1,41
L5C1 075	1,18	1,18	1,37
L5C1 046	1,21	1,21	1,43
L5C1 057	1,21	1,23	1,41
L5C1 068	1,19	1,19	1,41
SM IX (Mittelwerte)	1,21	1,22	1,42
L5C1 024	1,18	1,19	1,42
L5C1 055	1,22	1,23	1,43
L5C1 037	1,20	1,21	1,41
L5C1 064	1,22	1,24	1,40
SM X (Mittelwerte)	1,23	1,25	1,43
L5C1 043	1,20	1,23	1,42
L5C1 016	1,24	1,26	1,43
L5C1 066	1,27	1,28	1,45
L5C1 040	1,21	1,23	1,41
Spare-Kammer L5C1 048	1,18	1,19	1,39
alle Kammern (gemittelt)	1,21	1,22	1,42

Tab. 3.3: Übersicht über das Rauschverhalten aller im Zeitraum dieser Arbeit gebauten Kammern in den verschiedenen Konfigurationen. Die Mittelwerte aus den durchschnittlichen Kammerwerten liegen ein wenig höher als der Mittelwert aus den einzelnen Kanälen. Das hat statistische Gründe, da die Werte für eine Kammer sich der gemittelten Werten für die ROBs zusammensetzen, welche aus den gemittelten Werten der MCMs bestehen. Erst die Mittelwerte der MCMs beziehen sich direkt auf die Auslesekanäle.

4 Leistungsauswertung bei Teilchenkollisionen

4.1 Analyse von Kollisionen

Die Daten, welche bei den Teilchenkollisionen am LHC durch das ALICE-Experiment gesammelt werden, werden in sogenannten Runs gespeichert. Ein Run ist ein Zeitraum, in dem alle anfallenden Daten zusammengefasst sind und werden dann run-weise aufbereitet und analysiert. Jeder Run wird zusätzlich noch verschiedenen Methoden zur Datenaufarbeitung unterzogen. Jede dieser Methoden geht von verschiedenen Annahmen und Einstellungen aus und liefern so auch unterschiedliche Ergebnisse. Diese Methoden werden Pass genannt; für jeden Run gibt es also verschiedene Passes mit unterschiedlichen Ergebnissen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde jeweils der Pass 1 des jeweiligen Runs untersucht.

Die Beschreibung aller erzeugten Abbildungen der Supermodule im Run 114783 im folgenden Abschnitt 4.2 hat beispielhaften Charakter. Für die weiteren Runs beschränkt sich die Beschreibung auf die stack-weisen Darstellungen des Verhaltens des Übergangsstrahlungsdetektors. Alle hier erläuterten Runs wurden bei Proton-Proton-Kollisionen mit einer Energie von 7 TeV aufgezeichnet. Die genauen Daten der analysierten Runs (Datum, Dauer, Anzahl der Events) sind in Tabelle 4.1 angegeben.

Run	Datum	Dauer	Anzahl der Events
114783	30.03.2010	40 Min.	84,5 k
115186	03.04.2010	53 Min.	157 k
114890	10.04.2010	62 Min.	209 k
116203	13.04.2010	18 Min.	88 k

Tab. 4.1: Übersicht über die Daten der analysierten Runs

In dieser Arbeit soll unter Anderem das Leistungsniveau der einzelnen Stacks des ALICE-Übergangsstrahlungsdetektors untersucht werden. Hierzu wurde ein bestehendes Makro zur Auswertung herangezogen, welches die Leistungsdaten der verschiedenen Supermodule stack-weise ausgibt. Diese Histogramme beinhalten jeweils die Anzahlen der Cluster¹ pro Tracklet², der Tracklets pro Track und der Tracklets pro Layer und finden sich in Kapitel 4.

Dieses Makro wurde dann dahingehend verändert, dass die Mittelwerte der Histogramme „Cluster pro Tracklet“ und „Tracklets pro Track“ für die Stacks der aktiven Supermodule in jeweils einem Graphen zusammengefasst werden. Weiterhin wurde ein zusätzlicher Graph integriert, der den Anteil der Tracks mit sechs Tracklets für jeden Stack darstellt. Dieser Graph soll helfen, den Verlauf der Teilchenspuren besser zu verstehen.

Besteht ein Track aus sechs Tracklets, hat das verursachende Teilchen alle sechs Layer des Übergangsstrahlungsdetektors durchlaufen. Hat ein Track weniger Tracklets, so ist das Teilchen möglicherweise vor dem durchqueren aller Layer aufgrund des Magnetfeldes und seiner kinetischen Energie in einen benachbarten Stack gelenkt worden und hat seinen Flug dort fortgesetzt. Auch diese Graphen finden sich in Kapitel 4, zum Beispiel Abbildung 4.9.

Die so erzeugten Graphen bilden die Werte aller Stacks in nur einer Kurve ab. Um die Stacks nun voneinander zu unterscheiden, bedarf es einer weiteren Erklärung (siehe auch Tabelle 4.2). Die Stacks sind hier von 00 bis 34 durchnummeriert, mit dem Hintergrund, dass jedem Stack in jedem Supermodul eine im gesamten (aktuellen) Detektor eindeutige Nummer zugewiesen wird. Nach einem ähnlichen Schema errechnen sich die Stack- und Detektornummern im gesamten ALICE-Übergangsstrahlungsdetektor. Hier werden die Stacks von 00 bis 89 und die Kammern von 00 bis 539 durchnummeriert. Diese Zahlen errechnen sich aus der Nummer des Supermoduls (00 bis 17) und der Stack- bzw. Detektornummer im jeweiligen Supermodul (0-4 für Stacks, 0-29 für Detektoren/Kammern).

¹ Cluster entstehen, wenn ein Pion oder ein Elektron in der Vieldrahtproportionalammer eine Ionisation verursacht. Cluster, die einem Elementarteilchen zugeordnet werden können, werden zu einem Tracklet zusammengefasst.

² Tracklets sind die Teilchenspuren eines Elementarteilchens in einem Layer. Tracklets eines Elementarteilchens in mehreren Layern werden zu Tracks zusammengefügt.

Derzeit sind nicht alle Slots des ALICE-Übergangsstrahlungsdetektors mit Supermodulen besetzt. Die bereits eingesetzten Supermodule werden nach der Nummer des jeweiligen Slots mit arabischen Ziffern benannt, während sie außerhalb des Slots mit der Baunummer in römische Ziffern benannt sind. Supermodul IV (das vierte gebaute Supermodul) befindet sich nun im Slot mit der Nummer 9 und wird damit zu Supermodul 09. Die Tabelle 4.3 gibt die Zuordnung der Supermodule zu den Slots an.

Aktuell befinden sich sieben Supermodule (SM I bis SM VII) im ALICE-Experiment. Die weiteren Supermodule sind entweder noch nicht eingebaut oder die Kammern der Supermodule sind noch nicht mit Elektronik bestückt. Supermodul VIII befindet sich im CERN an der Oberfläche, die Kammern von SM IX werden gerade in Münster in den Rahmen des Supermoduls montiert und die Kammern zu SM X befinden sich noch am IKF in Frankfurt und an der GSI. Die Supermodule XI bis XVIII befinden sich noch in der Aufbauphase (Elektronikintegration der Kammern, Kammertests).

SM	Stacks
SM 00	Stacks 00 - 04
SM 01	Stacks 05 - 09
SM 07	Stacks 10 - 14
SM 08	Stacks 15 - 19
SM 09	Stacks 20 - 24
SM 10	Stacks 25 - 29
SM 17	Stacks 30 - 34

Tab. 4.2: Zuordnung der Supermodule zu den eindeutigen Stacknummern im aktuellen ALICE-TRD.

Baunummer des SM	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
TRD-Slot in ALICE	08	00	07	09	17	01	10	(16)	(11)
Baunummer des SM	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII
TRD-Slot in ALICE	(02)	(06)	(12)	(15)	(14)	(13)	(03)	(04)	(05)

Tab. 4.3: Zuordnung der Supermodule zu den ALICE-TRD-Slots. Die Supermodule VIII, IX und X sind noch nicht in ihren entsprechenden Slots, die weiteren Supermodule noch nicht gebaut oder befinden sich in der Bauphase.

4.2 Run 114783

In den, in diesem Abschnitt beschriebenen, stack-weisen Plots der einzelnen Supermodule wurden aus den Daten des Runs 114783 vier verschiedene Diagramme erstellt, die Rückschlüsse auf das Verhalten des Übergangsstrahlungsdetektors zulassen. In diesem Run werden alle Abbildungen zusammenfassend erklärt, während in den weiteren Runs lediglich die Gesamtdarstellungen aller Stacks erläutert werden.

In der obersten Histogrammzeile der Abbildungen 4.1 bis 4.7 ist die durchschnittliche Signalhöhe über der Driftzeit in Timebins aufgetragen (vergleiche hierzu Abbildung 2.9). Die Daten wurden zusätzlich mit einem Filter zur Tail Cancellation bearbeitet. Dies hat zur Folge, dass das Signal eher einer Gaussverteilung entsprechen als die Rohdaten.

Fortgesetzt wird die Darstellung für die Stacks aller Supermodule mit der Darstellung der „Anzahl der Tracklets über der Anzahl Cluster/Tracklet“. Diese Histogramme geben an, wie viele Tracklets jeweils aus wie vielen Clustern bestehen. Die Tatsache, dass keine Tracklets mit weniger als zehn Clustern/Tracklet aufgeführt sind, kommt daher, dass es nicht sinnvoll ist, Tracklets aus weniger als zehn Clustern zu erzeugen. Diese Tracklets wären nicht aussagekräftig genug für eine Auswertung.

In der dritten Zeile ist die „Anzahl der Tracklets pro Track“ aufgetragen. Die Histogramme zeigen, wie viele Tracks aus einem, zwei, usw. Tracklets aus diesem Stack bestehen. Ein Track, der aus sechs Tracklets besteht, hat somit alle Layer dieses Stacks nacheinander durchlaufen. Die Darstellung der Null am linken Rand der Histogramme soll einen einfacheren Zusammenhang zur letzten Histogramm-Zeile herstellen, in welcher die Anzahl der Tracklets für jeden Layer eines Stacks aufgetragen ist.

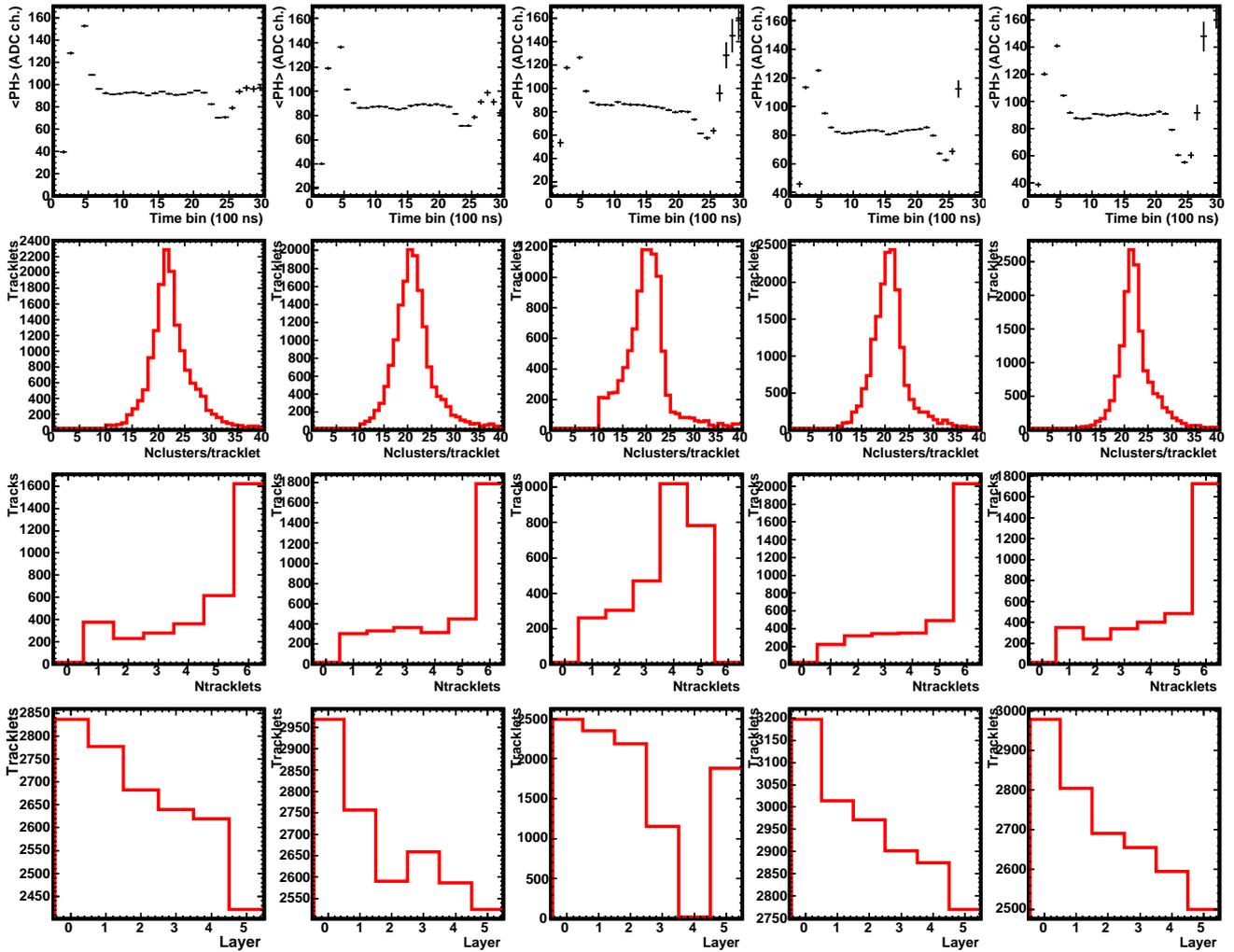


Abb. 4.1: SM00 im Run 114783. Hier hat die Kammer L4S2 keine Einträge bei den Histogrammen Tracklets pro Layer. Bei dieser Kammer ist die Elektronik wegen Ethernet-Problemen nicht betriebsbereit.

In dieser letzten Zeile lassen sich gestörte und/oder abgeschaltete Detektorkammern in jedem Supermodul identifizieren. Diese Kammern weisen in ihrer Spalte des Diagramms keine oder nur sehr wenige Einträge auf, wie es zum Beispiel im Supermodul 07, Stack 4, Layer 2 (07_2_4³) der Fall ist. Außerdem haben noch weitere Kammern in den anderen Supermodulen keine Einträge. Hierbei handelt es sich um 00_2_4 und 10_3_0. 01_0_2 und 01_3_2, sowie 17_1_4 und 17_3_5 haben augenscheinlich ebenfalls keine Einträge in diesen Histogrammen, jedoch weisen sie in späteren Auswertungen (siehe Abbildung 4.9 und Tabelle 4.4) eine geringe Anzahl von Einträgen auf. Weiterhin sind sehr viele Kammern vorhanden, die im Vergleich zu den anderen Kammern des gleichen Stacks weniger Einträge aufweisen. Hier ist zu beachten, dass die Y-Skala keineswegs immer mit dem Wert 0 beginnt sondern auch, der Übersichtlichkeit geschuldet, nach oben verschoben ist. (Beispiel: Abbildung 4.4, Stack 3.)

Durch die Anordnung der Kammern sollten im Layer 0 die meisten Tracklets zu finden sein. Die Anzahl der Tracklets nimmt im Normalfall in den höheren Layern ab. Hier sollten besonders die Kammern betrachtet werden, die weniger Einträge haben, als beide Nachbarkammern. Hier zeichnet sich möglicherweise ebenfalls ein Problem mit der Kammer ab. Sobald eine Kammer in einem Stack abgeschaltet ist, reduziert sich die maximale Anzahl der Tracklets pro Track von sechs auf fünf. Dies macht es in der Abbildung 4.9 (rechts) sehr einfach, Stacks mit durch technische Probleme beeinträchtigten Kammern zu identifizieren, da hier der Graph dann ebenfalls einen niedrigen Wert annimmt.

³ Diese Bezeichnung wird angewandt, wenn der Name der Kammer nicht bekannt oder ohne Belang ist, bzw. nur die Position einer Kammer benannt werden soll. Die Bezeichnung gibt die Position im Schema <SM>_<Stack>_<Layer> an. Ist nur die Position innerhalb des Supermoduls wichtig, kann auch die Bezeichnung L4S2 verwendet werden.

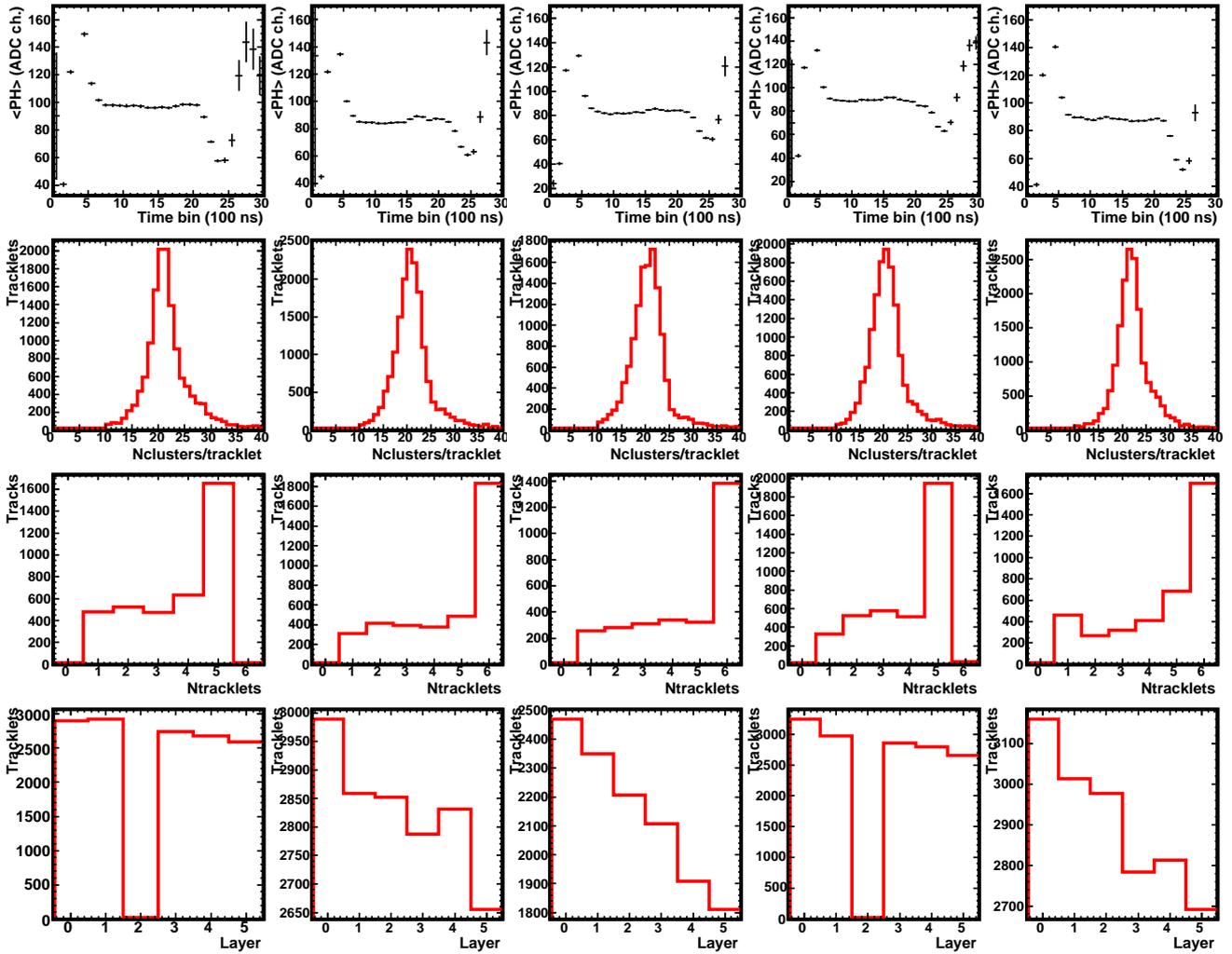


Abb. 4.2: SM01 im Run 114783. Gestört sind hier die Kammern L2S0 und L2S3, erkennbar daran, dass fast keine Einträge in den entsprechenden Histogrammen Tracklets pro Layer vorhanden sind (Anodenspannung zu niedrig).

In der Gesamtübersicht über alle Supermodule, Abbildung 4.8, spiegeln sich alle Ergebnisse der Einzelübersichten wider. In den ersten drei Histogrammzeilen gibt es keine großen Unterschiede zu den jeweiligen stack-weisen Ansichten während in der letzten Zeile in jedem Supermodul auffällt, dass der erwartete Verlauf der Kurven „Tracklets pro Layer“ gestört ist. Hier fällt auch eine einzelne abgeschaltete Kammer (beispielsweise 0_2_4) sofort durch einen niedrigen Wert im entsprechenden Layer ins Gewicht. Gravierender ist der Unterschied, wenn mehrere Kammern in verschiedenen Layern eines Supermoduls ausgeschaltet oder gestört sind, wie in Supermodulen 07 und 09 am Besten erkennbar ist.

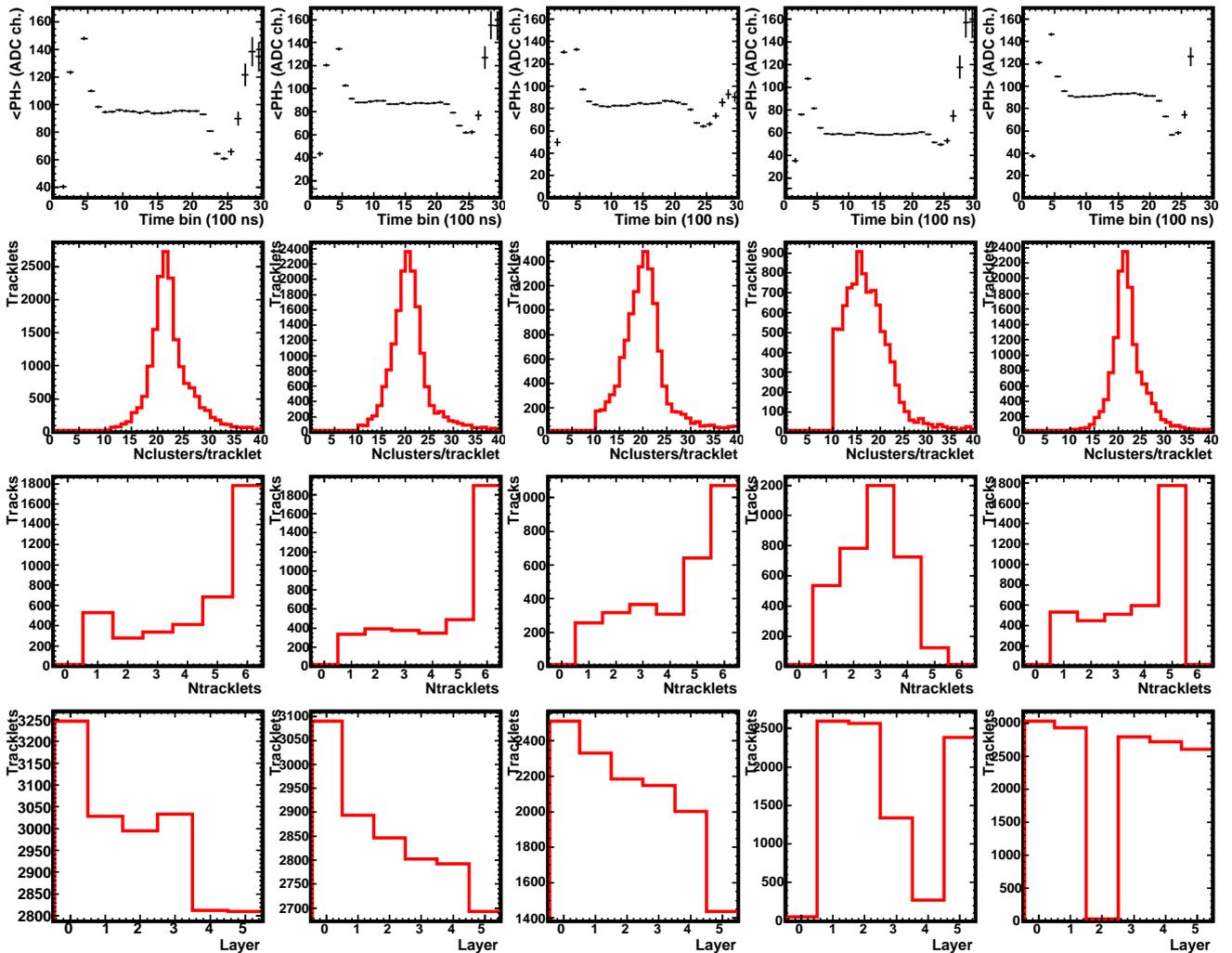


Abb. 4.3: SM07 im Run 114783. Hier ist die Elektronik der Kammer in L2S4 wegen einem defekten DCS-Board abgeschaltet. Weiterhin sind die Kammern LOS3, L3S3 und L4S3, sowie auch L2S0 auffällig durch ihre verhältnismäßig wenigen Einträge in den Histogrammen Tracklets pro Layer, da die Anodenspannung hier zu niedrig für einen ordnungsgemäßen Betrieb ist.

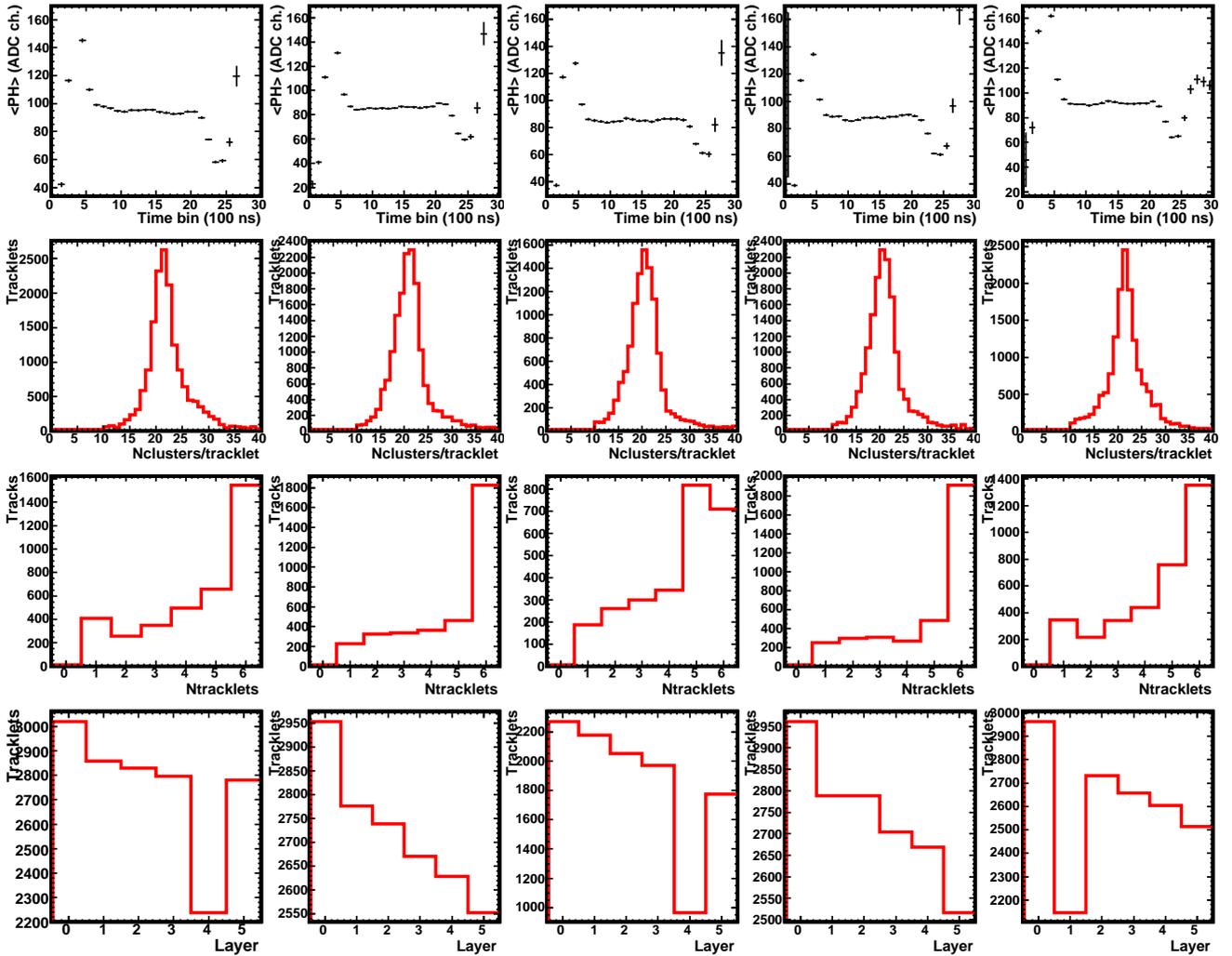


Abb. 4.4: SM08 im Run 114783. Im Vergleich zu den anderen Kammern des gleichen Stacks haben hier die Kammer L4S2 (defektes ORI) und LIS4 (Driftspannung) nur wenige Einträge bei Tracklets pro Layer.

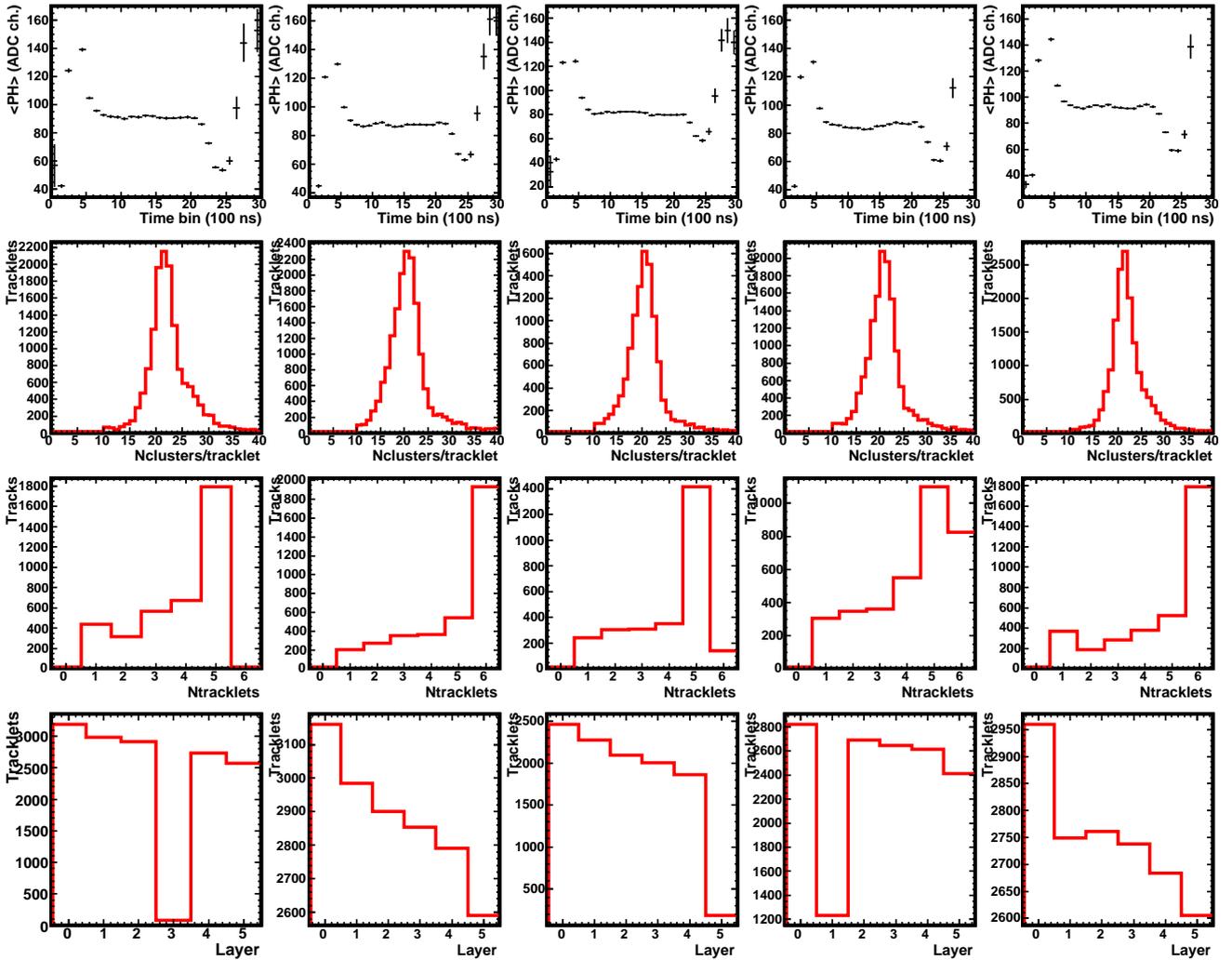


Abb. 4.5: SM09 im Run 114783. Durch technische Probleme haben hier die Kammern L3S0 und L1S2 (jeweils Anodenspannung zu niedrig) nur sehr wenige Einträge im jeweiligen Histogramm Tracklets pro Layer. Auf der Kammer L1S3 ist ein ORI abgeschaltet.

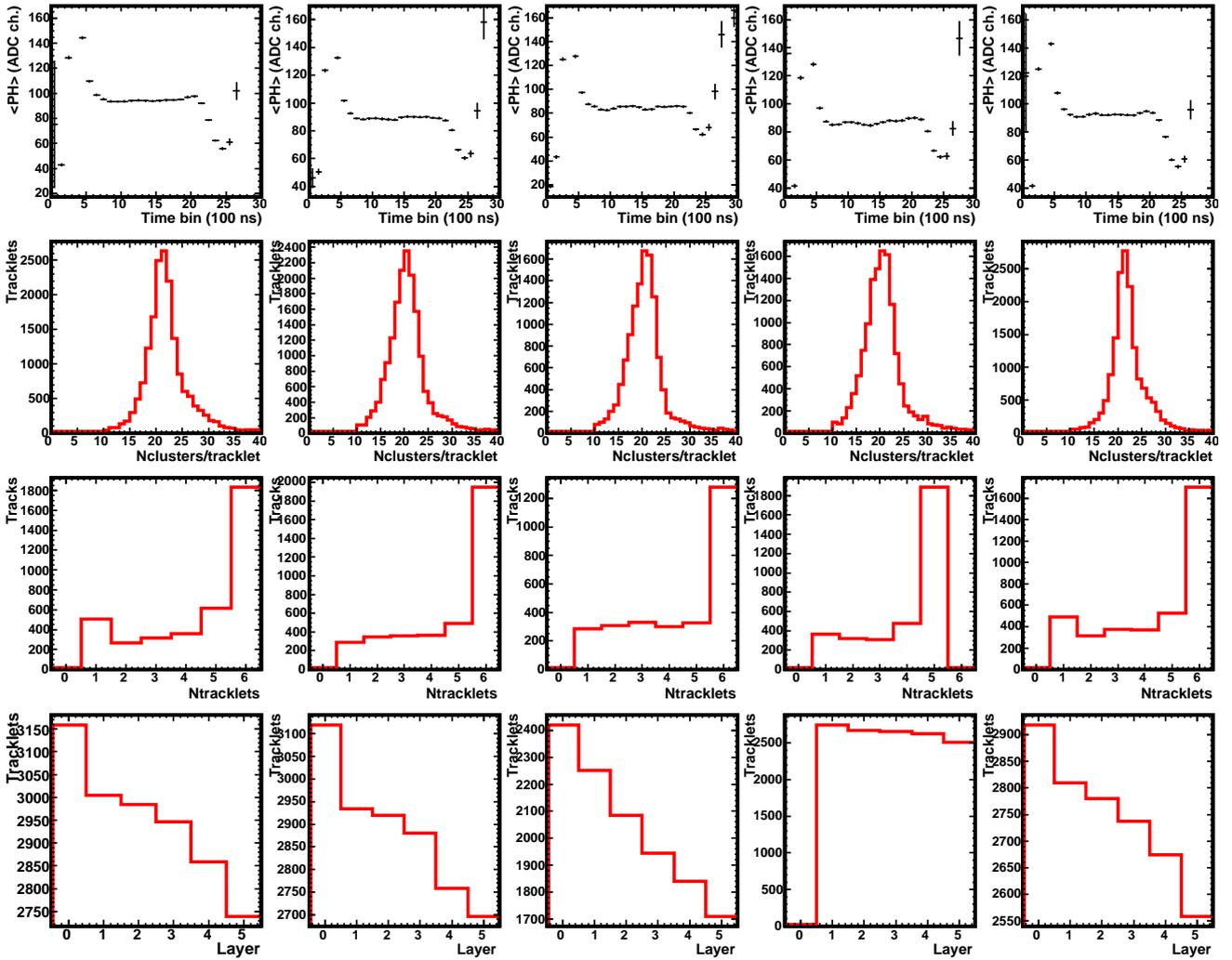


Abb. 4.6: SM10 im Run 114783. In diesem Supermodul ist die Elektronik der Kammer LOS3 wegen einem defekten DCS-Board abgeschaltet.

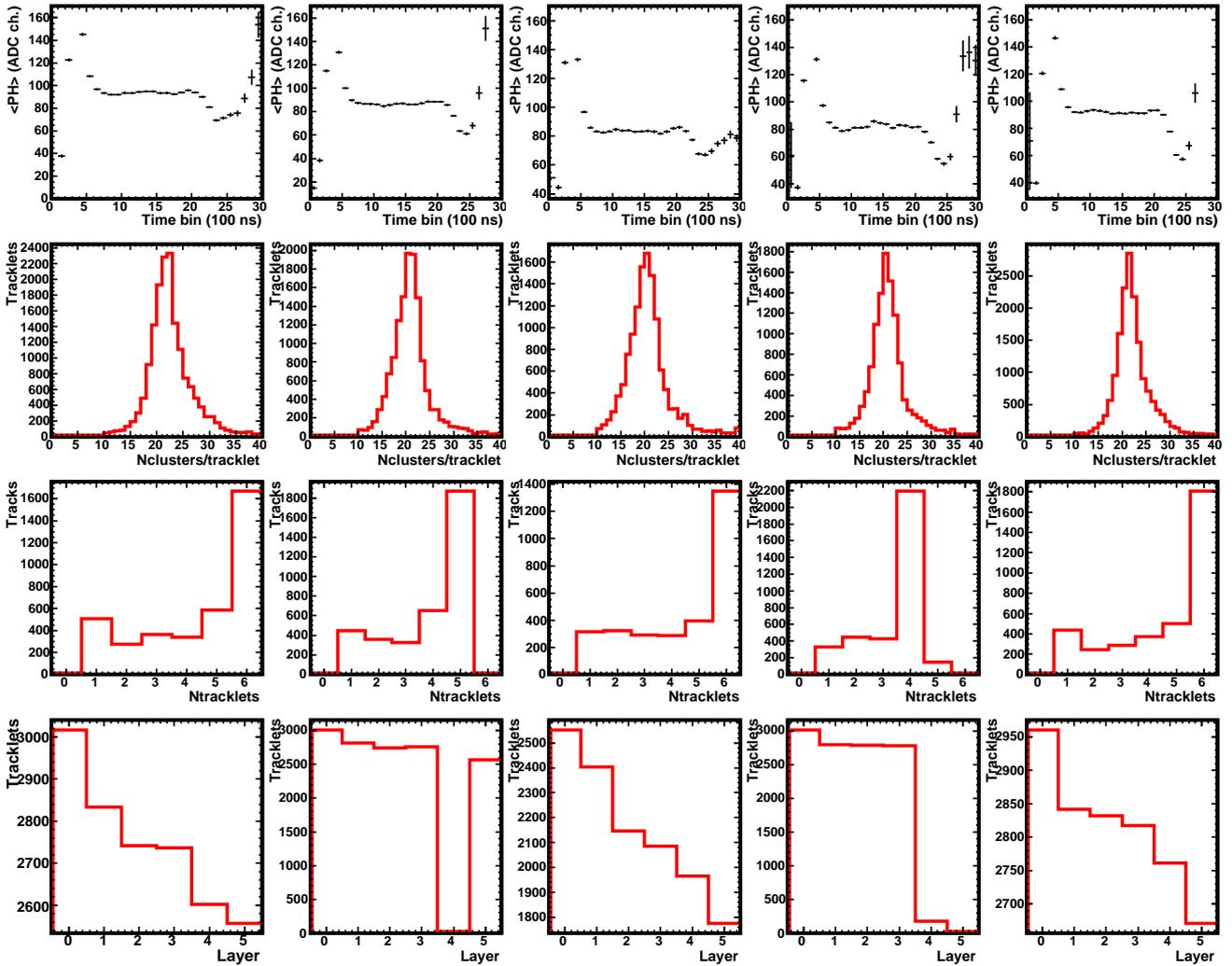
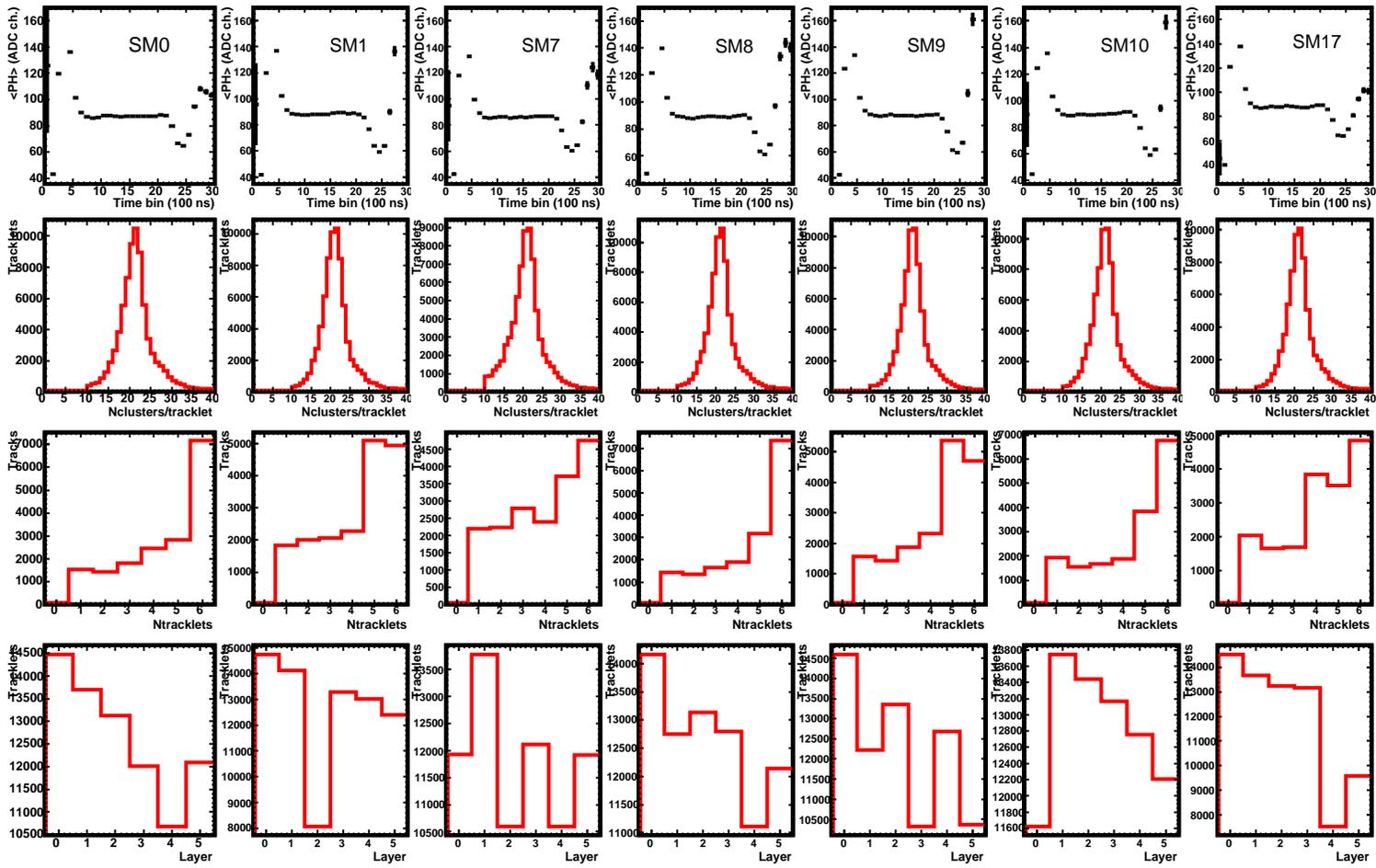


Abb. 4.7: SM17 im Run 114783. Die Kammern in L4S1 (Anodenspannung aus) und L5S3 (SCSN defekt) sind in diesem Supermodul gestört und L4S3 weist verhältnismäßig wenige Einträge im Histogramm Tracklets pro Layer auf.

Abb. 4.8: Alle Supermodule im Run 114783, zusammengefasst aus den Abbildungen 4.1 bis 4.7.



Speziell für diese Arbeit wurden Diagramme zur stack-weisen Verlaufsübersicht der der Erwartungswerte der „Anzahl der Cluster/Tracklet“ pro Stack, der „Anzahl der Tracklets“ pro Stack und des „Anteils Tracks mit sechs Tracklets“ pro Stack erstellt. Diese finden sich in der Abbildung 4.9. In dieser sind die Stacks von 00 bis 34 durchnummeriert. Wie diese Stacknummern einem Supermodul zugeordnet werden kann, ergibt sich aus der Tabelle 4.2. Diese werden in einem ähnlichen Schema vergeben wie die globalen Stack- und Detektornummern im ALICE-Experiment. Im Vergleich zu den stack-weisen Übersichten der Supermodule, kann man in der Übersicht über alle eingebauten Stacks direkte Vergleiche zwischen den Stacks ziehen.

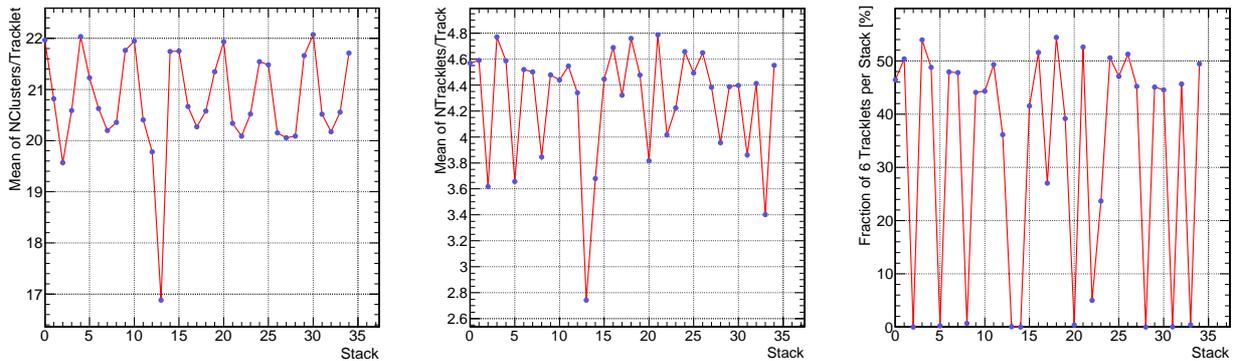


Abb. 4.9: Übersicht über den stack-weisen Verlauf der Erwartungswerte der Anzahl der Cluster pro Tracklet pro Stack (links), der Anzahl der Tracklets pro Stack (mitte) und des Anteils Tracks mit sechs Tracklets pro Stack (rechts) für den Run 114783. Zur Zuordnung der Stacknummern zu den Supermodulen, siehe 4.2.

Es fällt auf, dass Stack 13 in der Auftragung der „Cluster pro Tracklet“ lediglich einen Mittelwert von 16,88 aufweist. Verglichen mit dem Diagramm „Tracklets pro Cluster/Tracklet“ zu Stack 3 in Abbildung 4.3 kann man erkennen, dass dieser Stack eine geringere Anzahl an Tracklets aufweist. Ferner weist die Verteilungskurve hier eine größere Halbwertsbreite auf als die anderen Stacks und ist zudem asymmetrisch. Sie fällt im Bereich höherer Werte stärker ab, als sie bei den geringeren Werten ansteigt, ihr maximaler Wert liegt bei 15 Clustern pro Tracklet. Der Mittelwert von Stack 12 liegt hier bei 19,78 Clustern pro Tracklet, im Vergleich zu den anderen Stacks sind in der entsprechenden Verteilung keine Besonderheiten zu erkennen. Stack 02 mit einem Mittelwert von 19,57 hat, ähnlich wie Stack 13 eine asymmetrische Verteilungskurve in „Tracklets pro Cluster/Tracklet“, die nach dem Maximum bei 21 Clustern pro Tracklet stark abfällt (Abbildung 4.1). Alle anderen Stacks bewegen sich im Mittel in einem Bereich von 20 bis 22,5 Clustern pro Tracklets.

Weiterhin ist noch erkennbar, dass der Graph eine „Oszillation“ aufweist und im Bereich der Ränder der Supermodule die Anzahl der Cluster pro Track ansteigt. Begründen lässt sich diese Erscheinung durch die Winkelabhängigkeit und den damit einhergehenden längeren Weg, den ein Teilchen im Detektor zurücklegt. Der längere Weg im Detektor begünstigt die Erzeugung von Clustern und steigert so den Wert Cluster/Track. Im Vergleich haben beispielsweise die Stacks 02, 07 und 17, welche sich in der Mitte ihres jeweiligen Supermoduls befinden, geringere Werte.

Anders sieht es bei der Darstellung der Mittelwerte der „Tracklets pro Track“ aus. Die Stacks liegen zwar alle relativ im gleichen Bereich zwischen 4,0 und 4,8 Tracklets pro Track, allerdings gibt es auch hier abweichende Stacks. Der Stack mit dem niedrigsten Wert ist hier ebenfalls Stack 13 mit einem Mittelwert von 2,74. Jedoch lässt sich in diesem Stack nichts weiter auffälliges feststellen, außer einer vielleicht geringeren Anzahl an Tracklets insgesamt und einer ausgeschalteten Kammer.

Die nächst höheren Werte des mittleren Graphen in Abbildung 4.9 gehören zu den Stacks 33 (Mittelwert 3,40), 02 (Mittelwert 3,62), 05 (Mittelwert 3,66) und 14 (Mittelwert 3,68). Vergleicht man hier den Graphen des Anteils der Tracks mit sechs Tracklets, lässt sich eine Korrelation mit den abgeschalteten Kammern herstellen. Kein Stack mit einer abgeschalteten Kammer erreicht einen Mittelwert von mehr als 4,0 Tracklets pro Track. Der höchste Mittelwert bei einer ausgeschalteten Kammer liegt bei 3,85 Tracklets Pro Track in Stack 08. Stack 22 weist einen Mittelwert von 4,02 auf, bedingt durch eine sehr niedrige Anzahl von gemessenen Tracks in Layer 5 dieses Stacks.

Ähnlich verhält es sich bei dem dritten stack-weisen Graphen, der den Anteil der Tracks angibt, welche aus sechs Tracklets bestehen. Diese Kurve schwankt, mit Ausnahme der Stacks mit abgeschalteten Kammern, zwischen 40 und 50 %. Stacks mit abgeschalteten oder gestörten Kammern lassen sich hier leicht identifizieren, da sie im Graphen einen Wert

von 0 aufweisen. Zusätzlich ist hier noch zu erwähnen, dass mehrere Stacks hier nur einen Wert nahe Null besitzen. Diese Stacks beinhalten eine Kammer, die einen niedrigen Gain hat, zum Beispiel Stack 05. Für die genauen Werte der Stacks sei hier auf Tabelle 4.4 verwiesen. Diese Tabelle enthält auch die Positionsangabe der defekten Kammer nach dem Schema $\langle SM \rangle_ \langle Stack \rangle_ \langle Layer \rangle$.

Stack	02	05	08	13	14	20	28	31	33
Defekte Kammer	00_2_4	01_0_2	01_3_2	07_3_0	07_4_2	09_0_3	10_3_0	17_1_4	17_3_5
Tracks mit 6 Tracklets	0	9	27	3	0	14	0	1	15
Anteil in %	0	0,24	0,69	0,09	0	0,37	0	0,03	0,42

Tab. 4.4: Stacks mit niedrigen Anteilen an Tracks mit 6 Tracklets in Run 114783. In diesen Stacks sind Kammern an den angegebenen Positionen gestört oder abgeschaltet.

4.3 Run 115186

Im Vergleich zum vorher beschriebenen Run 114783 ist die Detektorleistung im Run 115186 etwas besser anzusiedeln. Im Graphen „Cluster pro Tracklet“ pro Stack für diesen Run (Abbildung 4.10 links) liegen nun alle Stacks in einem Bereich von 20 bis 22 Clustern pro Tracklet. Hierbei existieren aber Abweichungen, sowohl nach oben, als auch nach unten. Mit einem Mittelwert von 19,36 hat Stack 12 den geringsten Mittelwert, der nächsthöhere Mittelwert (19,71) für Stack 02 und schließlich 19,81 für Stack 21. Das obere Ende des Spektrums bilden Stack 00 mit einem Mittelwert von 22,30 sowie Stack 30 mit im Mittel 22,17 Clustern pro Track. Die Stacks 02 und 12 sind bereits in Run 114783 durch niedrige Werte aufgefallen, während aber Stack 13 zumindest in dieser Darstellung im Normalbereich liegt.

Der Graph „Tracklets pro Track“ liefert in diesem Run ein ähnliches Bild wie in Run 114783. Die Mittelwerte liegen hauptsächlich zwischen 3,9 und 4,8 Tracklets pro Track, den Höchstwert liefert Stack 18 mit einem Wert von 4,76 Tracklets pro Track. Den niedrigsten Wert liefert hier erneut Stack 13 mit einem Wert von 2,54 Tracklets pro Track. Die weiteren Kammern, welche einen Wert unterhalb 3,9 Tracklets pro Track im Mittel aufweisen, sind die Stacks 02, 05, 08, 10, 14, 20 und 33. Alle Stacks wiesen auch im vorherigen untersuchten Run niedrige Werte auf, während Stack 31 gerade noch so im Normalbereich zu finden ist. Der Mittelwert dieses Stacks liegt bei 3,96, der Mittelwert des nächsthöheren unauffälligen Stacks bei 4,03 (Stack 15).

Die Anzahl der Stacks mit beinahe keinem Anteil an Tracks mit sechs Tracklets hat sich in diesem Run von neun in Run 110783 auf zwölf erhöht. Die meisten dieser Stacks zeigten keine Änderung im Gegensatz zum vorher beschriebenen Run. Die Werte von Stack 09 und Stack 21 haben sich im Vergleich zu vorher stark verringert (Stack 09 vorher 44,08 % jetzt 27,73 %, Stack 21 vorher 52,62 % jetzt 0,17 %). Für Stack 09 ist möglicherweise die L3-Kammer für diese Änderung verantwortlich, in Stack 21 wurde die Reduzierung des Wertes ebenfalls durch die entsprechende L3-Kammer verursacht. In Tabelle 4.5 sind alle Stacks mit den niedrigsten Anteilen an Tracks mit sechs Tracklets aufgelistet.

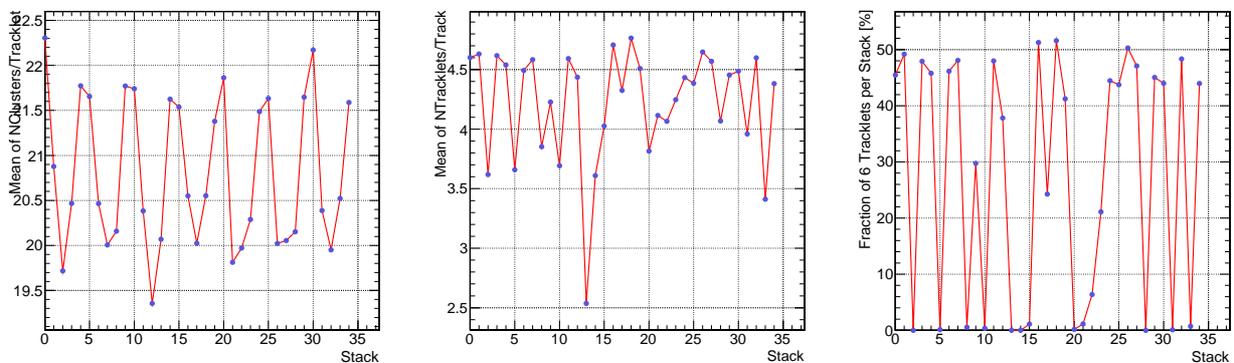


Abb. 4.10: Übersicht über den stack-weisen Verlauf der Erwartungswerte der Anzahl der Cluster pro Tracklet pro Stack (links), der Anzahl der Tracklets pro Stack (mitte) und des Anteils Tracks mit sechs Tracklets pro Stack (rechts) für den Run 115186. Zur Zuordnung der Stacknummern zu den Supermodulen, siehe 4.2.

Stack	02	05	08	13	14	15	20	21	28	31	33
defekte Kammer	00_2_4	01_0_2	01_3_2	07_3_3	07_4_2	08_0_0	09_0_3	09_1_0	10_3_0	17_1_4	17_3_5
Tracks mit 6 Tracklets	0	10	41	1	0	69	14	73	0	1	15
Anteil in %	0	0,13	0,57	0,02	0	1,11	0,37	1,15	0	0,03	0,42

Tab. 4.5: Stacks mit niedrigen Anteilen an Tracks mit 6 Tracklets in Run 115186. In diesen Stacks sind Kammern an den angegebenen Positionen gestört oder abgeschaltet.

4.4 Run 115890

Bei diesem Run liegen alle Stacks für die Anzahl der Cluster pro Tracklet in Abbildung 4.11 (links) in einem Bereich von 20 bis 22,5 Cluster pro Tracklet. Markant ist in dieser Darstellung die höchste mittlere Anzahl an Clustern pro Tracklet bei Stack 30 und einem Mittelwert von 22,87 Cluster pro Tracklet. Der niedrigste Mittelwert gehört zu Stack 02 bei einem Wert von 20,03 Clustern pro Tracklet. Diese Extremwerte liegen dennoch im normalen Bereich.

Für den mittleren Graphen von Abbildung 4.11 „Tracklets pro Track“ gibt es in diesem Run einige Wertschwankungen. Legt man den bereits vorher verwendeten Bereich von 4,0 bis 4,8 Tracklets pro Track als Normalbereich fest, so verfehlen in diesem Run acht Stacks diesen Bereich deutlich, sowie ein Stack knapp. Die Stacks mit den niedrigsten Werten sind bereits aus den vorherigen Runs bekannt und decken sich exakt mit den Stacks, welche problematische Kammern enthalten. Die höchsten Mittelwerte gehören hier zu Stack 01 (Wert 4,76) und Stack 18 (Wert 4,75). Den niedrigsten Mittelwert weist in diesem Run Stack 33 auf, der Zahlenwert liegt bei 3,39 Tracklets pro Track.

Es ist offensichtlich, dass diese niedrigen Werte mit den beeinträchtigten Kammern der Stacks zusammenhängen, da das einzig unbeeinträchtigte Supermodul 08 über alle Stacks (15 bis 19) in allen bisher beschriebenen Runs Mittelwerte aufweist, die sich in einem ähnlichen Bereich bewegen. Beim hiesigen Run liegt dieser Bereich zwischen 4,29 und 4,75 Tracklets pro Track. Dieser Bereich entspricht in etwa dem Bereich bei den Runs 114783 und 115186.

Die Auftragung der Anteile der Tracks mit sechs Tracklets bietet ein mittlerweile bekanntes Bild. Die Stacks mit den problematischsten Kammern weisen einen Wert nahe Null auf, während die am wenigsten beeinträchtigten Stacks in einem Bereich zwischen 40 und 50 % zu finden sind. In Supermodul 08 findet sich ebenfalls ein Stack mit einem Wert von weniger als 30 % (Stack 17), in diesem Stack findet sich eine L4-Kammer mit verhältnismäßig wenigen registrierten Tracklets. Somit kann der Grund für diesen niedrigen Anteilswert ausgemacht werden. Die höchsten Anteile an Tracks mit sechs Tracklets haben Stack 02 (Anteil 51,83 %), Stack 18 (Anteil 51,57 %) und Stack 26 (Anteil 51,47 %), die Stacks mit den niedrigsten Werten sind in Tabelle 4.6 aufgeführt.

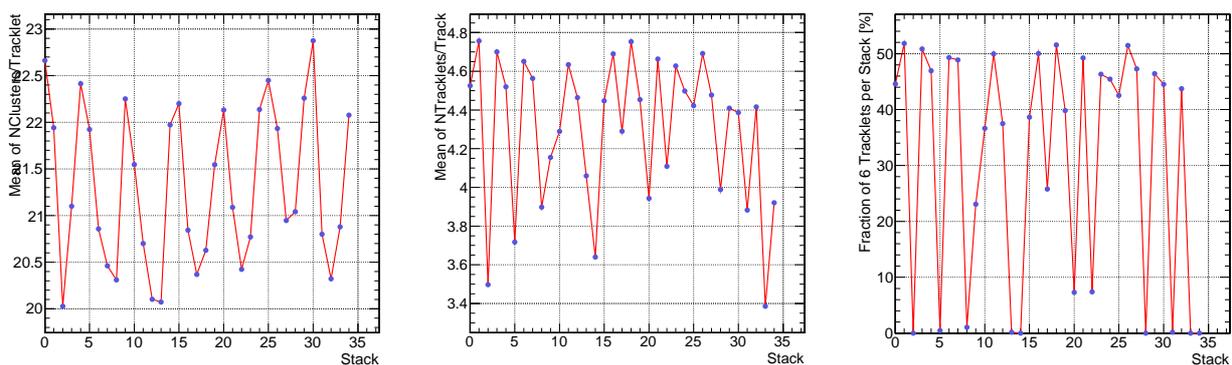


Abb. 4.11: Übersicht über den stack-weisen Verlauf der Erwartungswerte der Anzahl der Cluster pro Tracklet pro Stack (links), der Anzahl der Tracklets pro Stack (mitte) und des Anteils Tracks mit sechs Tracklets pro Stack (rechts) für den Run 115890. Zur Zuordnung der Stacknummern zu den Supermodulen, siehe 4.2.

Stack	02	05	08	13	14	28	31	33	34
Defekte Kammer	00_2_4	01_0_2	01_3_2	07_3_0	07_4_2	10_3_0	17_1_4	17_3_5	17_4_5
Tracks mit 6 Tracklets	0	47	103	13	0	0	16	15	0
Anteil in %	0	0,47	1,06	0,15	0	0	0,16	0,42	0

Tab. 4.6: Stacks mit niedrigen Anteilen an Tracks mit 6 Tracklets in Run 115890. In diesen Stacks sind Kammern an den angegebenen Positionen gestört oder abgeschaltet.

4.5 Run 116203

Auch für diesen Run liegen die Mittelwerte aller Stacks in einem Bereich von 20 bis 22,5 Clustern pro Tracklet. Unterschritten wird dieser Bereich lediglich von Stack 12 (Wert 19,97). In diesem Stack (Layer 5) hat eine Kammer ein Problem mit dem Drift, ob diese Abweichung daher kommt oder lediglich eine statistische Schwankung ist, kann hier nicht abschließend geklärt werden. Nach oben wird die Marke von 22,5 Clustern pro Tracklet von Stack 00 (Wert 22,82) und Stack 30 (Wert 22,57) übertroffen.

Der Bereich für die Anzahl der Tracklets pro Track, in dem in diesem Run die meisten Stacks zu finden sind, liegt zwischen 3,9 und 4,8 Tracklets pro Track. Unterschritten wird dieser Bereich wieder von den Stacks mit problematischen Kammern. Es fällt auf, dass sich im Vergleich zu den früheren Runs die Werte von SM08 (Stacks 15 bis 19) kaum verändert haben. Das Maximum dieses Supermoduls liegt bei 4,83 für Stack 18 und das Minimum bei 4,31 für Stack 17.

Die Stacks mit den niedrigsten Werten sind bereits aus den vorherigen Runs für niedrige Werte bekannt. Es handelt sich hierbei um Stack 02 (Mittelwert bei 3,61), Stack 05 (Mittelwert bei 3,66), Stack 14 (Mittelwert bei 3,64) und Stack 33 (Mittelwert bei 3,40). Wegen einer defekten Kammer liegt auch Stack 34 mit einem Wert von 3,87 unterhalb des Normalbereiches.

Der Anteil der Tracks mit sechs Tracklets liefert in diesem Run auch das gewohnte Bild. Mehrere Stacks weisen wegen defekter Kammern (abgeschaltet oder Probleme wegen zu niedriger Anoden- oder Driftspannung) nur Werte um Null auf, während andere Stacks, welche Kammern mit Drift-Problemen beinhalten, einen um Faktor 2-3 geringeren Anteil anzeigen. Dennoch liegen die meisten Stacks wieder im Bereich von 40 bis 50%, den größten Anteil besitzen die Stacks 16 und 18 mit Werten von 54,62 und 53,53%. Die Stacks mit den niedrigsten Werten enthält Tabelle 4.7.

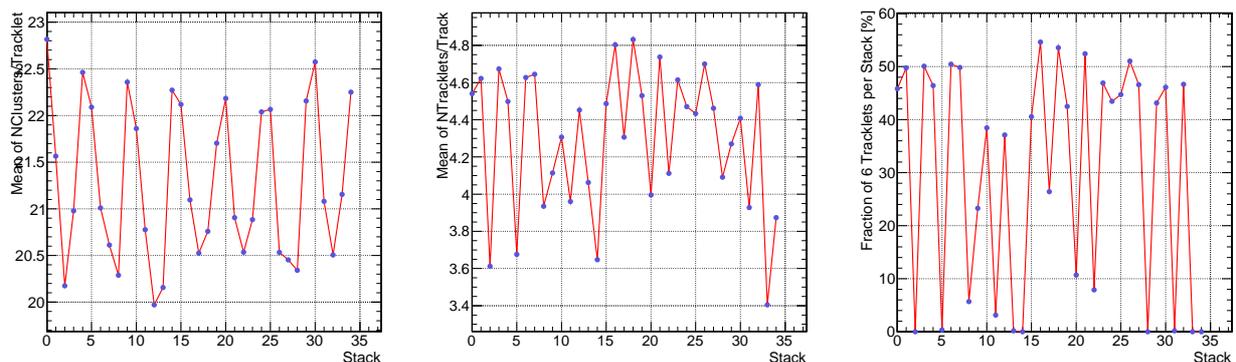


Abb. 4.12: Übersicht über den stack-weisen Verlauf der Erwartungswerte der Anzahl der Cluster pro Tracklet pro Stack (links), der Anzahl der Tracklets pro Stack (mitte) und des Anteils Tracks mit sechs Tracklets pro Stack (rechts) für den Run 116203. Zur Zuordnung der Stacknummern zu den Supermodulen, siehe 4.2.

Stack	02	05	13	14	28	31	33	34
Defekte Kammer	00_2_4	01_0_2	07_3_0	07_4_2	10_3_0	17_1_4	17_3_5	17_4_5
Tracks mit 6 Tracklets	0	14	7	0	0	8	0	0
Anteil in %	0	0,34	0,18	0	0	0,19	0	0

Tab. 4.7: Stacks mit niedrigen Anteilen an Tracks mit 6 Tracklets in Run 116203. In diesen Stacks sind Kammern an den angegebenen Positionen gestört oder abgeschaltet.

4.6 Problematische Kammern

In der Analyse der Runs in den Abschnitten 4.2 bis 4.5 traten immer wieder die gleichen Stacks wegen niedriger Werte bei den Graphen „Tracklets pro Track“ und „Anteil der Tracks mit 6 Tracklets“ hervor. In diesen Stacks wurden Kammern verbaut, welche technische Probleme mit dem Kammerkörper aufweisen und so entweder keine oder nur geringe Mengen an Daten produzieren (niedrige Anodenspannung) oder deren Daten keine hohe Aussagekraft haben, da die Driftspannung nicht dem Nominalwert (für jede Kammer individuell, um eine einheitliche Driftgeschwindigkeit zu erreichen) entspricht. Die problematischen Kammern sind in der Tabelle 4.8 mit der jeweiligen Erklärung aufgeführt.

Stack	Defekte Kammer	Problem	Resultat
00	00_0_5	Driftspannung niedriger	Daten nicht aussagekräftig
01	00_1_2	Driftspannung niedriger	Daten nicht aussagekräftig
02	00_2_4	keine Ethernet-Verbindung	Kammer nicht betriebsbereit
05	01_0_2	Anodenspannung zu niedrig	keine Daten
08	01_3_2	Anodenspannung zu niedrig	keine Daten
10	07_0_2	Anodenspannung niedrig	Faktor 2-3 weniger Daten
11	07_1_4	Driftspannung niedriger	Daten nicht aussagekräftig
12	07_2_5	Driftspannung zu niedrig	Daten nicht aussagekräftig
13	07_3_0	Anodenspannung zu niedrig	keine Daten
13	07_3_3	Anodenspannung niedrig	Faktor 2-3 weniger Daten
14	07_4_2	DCS-Board defekt (Drift)	Kammer nicht betriebsbereit
19	08_4_1	Driftspannung zu niedrig	Daten nicht aussagekräftig
20	09_0_3	Anodenspannung niedrig	Faktor 2-3 weniger Daten
22	09_2_5	Driftspannung zu niedrig	Daten nicht aussagekräftig
28	10_3_0	DCS-Board defekt	Kammer nicht betriebsbereit
30	17_0_2	Driftspannung niedriger	Daten nicht aussagekräftig
31	17_1_4	Anodenspannung aus	keine Daten
33	17_3_4	Anodenspannung aus	keine Daten
33	17_3_5	SCSN defekt	Kammer nicht betriebsbereit
34	17_4_5	Anodenspannung zu niedrig	keine Daten

Tab. 4.8: Auflistung der problematischen Kammern in den jeweiligen Stacks.

5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Kammerbau und Testverfahren

Die während dieser Arbeit auf Kammern integrierte Elektronik entspricht einem hohen Qualitätsniveau. Es mussten kaum Readout-Boards ausgetauscht werden und die Testergebnisse sind ohne Beanstandungen. Lediglich die Kabelbrücken sind weiterhin störanfällig. Die gebauten Kammern für die Supermodule VIII, XI und X, sowie die Spare-Kammer haben die GSI in voll funktionsfähigem Zustand verlassen. Lediglich das Rauschverhalten der Kammern hat sich im Allgemeinen leicht verschlechtert, ist aber dennoch zufriedenstellend.

Der Teststand ist weiterhin ausbaufähig und sollte in der Konzeption, vor allem in der Software-Konfiguration, den Testständen am IKF Frankfurt angepasst und aktualisiert werden. Möglicherweise kann dann auch ein automatischer Testzyklus realisiert werden, der am Ende eine Protokolldatei mit allen Messergebnissen erzeugt, die in die Zuordnungsdatenbanken eingebunden werden kann. Damit würde auch die Tatsache behoben, dass im Moment alle Test- und Messergebnisse lokal auf dem Testcomputer gespeichert werden und so die Gefahr besteht, dass die Daten bei einem Computerfehler unwiderruflich verloren gehen.

5.2 Leistungsanalysen

Abschließend kann man den Übergangsstrahlungsdetektor des ALICE-Experiments nicht eindeutig beurteilen. Einerseits sind viele der Detektorkammern im Inneren voll funktionsbereit, andererseits haben aber die Kammern, welche durch ein technisches Problem beeinträchtigt sind, einen Einfluss ihren beinhaltenden Stack. Die Auswertung der von den Kammern aufgezeichneten Signale und die Weiterverarbeitung der Cluster zu Tracklets und weiter zu Tracks wird durch die problematischen Kammern erschwert. In Tabelle 4.8 sind 20 gestörte Kammern in 18 Stacks aufgelistet. Zwar treten die Probleme nicht in jedem Run auf, aber dennoch sind 20 von derzeit 210 Detektorkammern in 18 von derzeit 35 Stacks nur vermindert leistungsfähig. Das ist ein Anteil von 9,5% bei den Kammern und 51,4% bei den Stacks.

Die Kammern können in nächster Zeit wohl eher nicht ausgebaut und repariert werden, da man dann konstruktionsbedingt auf ein ganzes Supermodul verzichten müsste. Es ist lediglich möglich, die Kammern der noch nicht gebauten Supermodule auf die aufgetretenen Schwächen zu untersuchen und diese Fehler im Vorfeld zu beheben. Weiterhin muss der Einfluss der gestörten Kammern aus dem Gesamtergebnis des ALICE-Detektors herausgerechnet werden, um die erhaltenen Daten bestmöglich nutzen zu können.

A Bilder der Ausleseelektronik

Hier finden sich einige Bilder zur Elektronikintegration und zur Elektronik an sich.

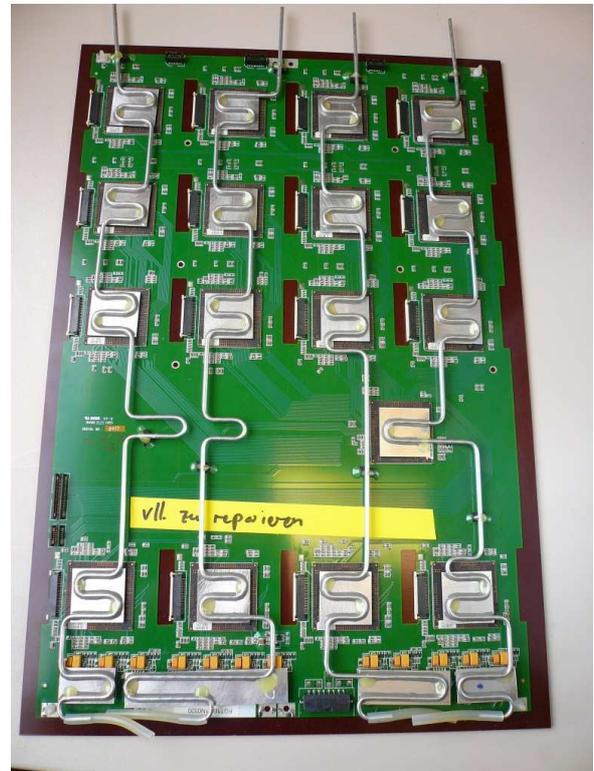


Abb. A.1: Eine L5-Kammer vollständig bestückt und bereit für den ersten Testzyklus (links) und ein Readout-Board mit Cooling-Pipes (rechts).

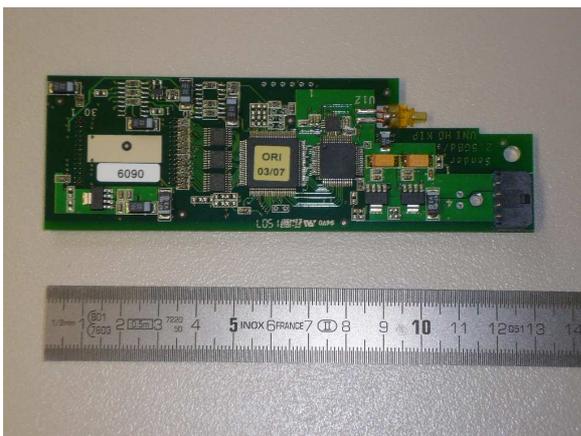


Abb. A.2: Optical-Readout-Interface (ORI) zur optischen Signalauslese (links) und Detector-Control-System (DCS) zur Steuerung der Front-End-Elektronik (rechts)

B Befehle für Kammertests

Hier ist der Ablauf eines kompletten Testzyklus mit allen Befehlen sowie der Vorbereitung vor dem ersten Testzyklus aufgelistet. Die Schritte zur Vorbereitung müssen natürlich nur vor dem ersten Test der Kammer (mit diesem DCS-Board) ausgeführt werden, nicht vor jedem Testzyklus. Die Vorgehensweise zur Elektronikintegration sowie eine genauere Beschreibung der Tests kann unter [32] nachgelesen werden.

- Vorbereitungen vor dem ersten Test
 - Kammer integrieren und Elektronik (ROBs, DCS und ORIs) in GATE-Datenbank eintragen
 - Kammer in WING-Datenbank einfügen mit
gate2wing L5C1_XXX=1_S_5 mit XXX als Kammernummer und S als Stack
 - DCS-Board alidcsdcb-Alias zuweisen mit
emacs /var/named/chroot/var/named/master/trd.net.zone
Am Ende der Datei einfügen, XXXX ist im Folgenden die vierstellige DCS-Nummer:
dcsXXXX IN CNAME alidcsdcb0035 für Stack 0
dcsXXXX IN CNAME alidcsdcb0041 für Stack 1
dcsXXXX IN CNAME alidcsdcb0047 für Stack 2 (nur für CO-Kammern nötig)
dcsXXXX IN CNAME alidcsdcb0053 für Stack 3
dcsXXXX IN CNAME alidcsdcb0059 für Stack 4
als ROOT (ssh root@dlpc050):
service named restart und
service dhcpd restart
 - Update der DCS-Firmware
ssh dcsXXXX und Firmware-Version prüfen
ssh root@horst
cd /firmware/dcs_firmware_latest_120509/
make DCS_FLAVOR=trd_ipkg dcsXXXX
./remoteupdate.sh hexfiles-dcsXXXX-trd_ipkg.hex dcsXXXX all
ssh dcsXXXX und reboot
ssh dcsXXXX und Update der Datenbanken mit
ipkg update, ipkg upgrade und ipkg install feeserver-dlopen
- Kammertests und Messungen des Rauschverhaltens
 - Kammertests
./prepare_dir.pl
./shutdown_test.sh
./reset_test.sh
dimcoco zum Starten des InterComLayers
./ssh-dcs.sh und /etc/init.d/rc/feeserver.sh zum Starten des Feeservers
nginject 01_S_5 112 für Standby des Feeservers
./ce_test.pl 1 bis ./ce_test.pl 9, die Ausgabe ist entweder Test... is DONE and OK und New State: Standby bei bestandenem Test oder New State: ERROR bei einem Fehler. Fehlermeldungen können mit nginject 01_S_5 112 mit S als Stack zurückgesetzt werden.
./check_laser_ids.pl
./HCM2ORI2ACEX_Test.sh
 - Rauschverhalten
./do_init.sh nf
./opt_readout_ffm.sh s 100 Noise
./rstate_auto.pl
./start_readout.sh _current/{Dateiname} (Beispiel für Ergebnis: Abbildung C.1)
./do_init.sh p
./opt_readout_ffm.sh s 100 Noise

```
./rstate_auto.pl
./start_readout.sh _current/{Dateiname} (Beispiel für Ergebnis: Abbildung C.2)
./do_init.sh pgt
./opt_readout_ffm.sh s 100 Noise
./rstate_auto.pl
./start_readout.sh _current/{Dateiname} (Beispiel für Ergebnis: Abbildung C.3)
Grounding-Kabel an Kammerstirnseite ablöten und mit Pulser verbinden
./do_init.sh p
./opt_readout_ffm.sh p 100 Pulser
./rstate_auto.pl
./start_readout.sh _current/{Dateiname} (Beispiel für Ergebnis: Abbildung C.4)
Grounding-Kabel vom Pulser trennen und an Kammerstirnseite anlöten
```

– Stresstest

```
./do_init.sh p
./time_of_stresstest.pl, Länge eines Zyklus: 600 Sekunden
screen -R ST
./stress_test.sh 600 72 für 72 Zyklen (12 Stunden)
STRG + a, STRG + d zum Verlassen der screen-Umgebung
```

C Plots zu Messungen des Rauschverhaltens

Beispielhaft werden hier alle erstellten Plots der Kammer L5C1 048, der Spare-Kammer, aufgeführt. Die erhaltenen Ergebnisse entsprechen etwa dem Durchschnitt.

C.1 L5C1 048

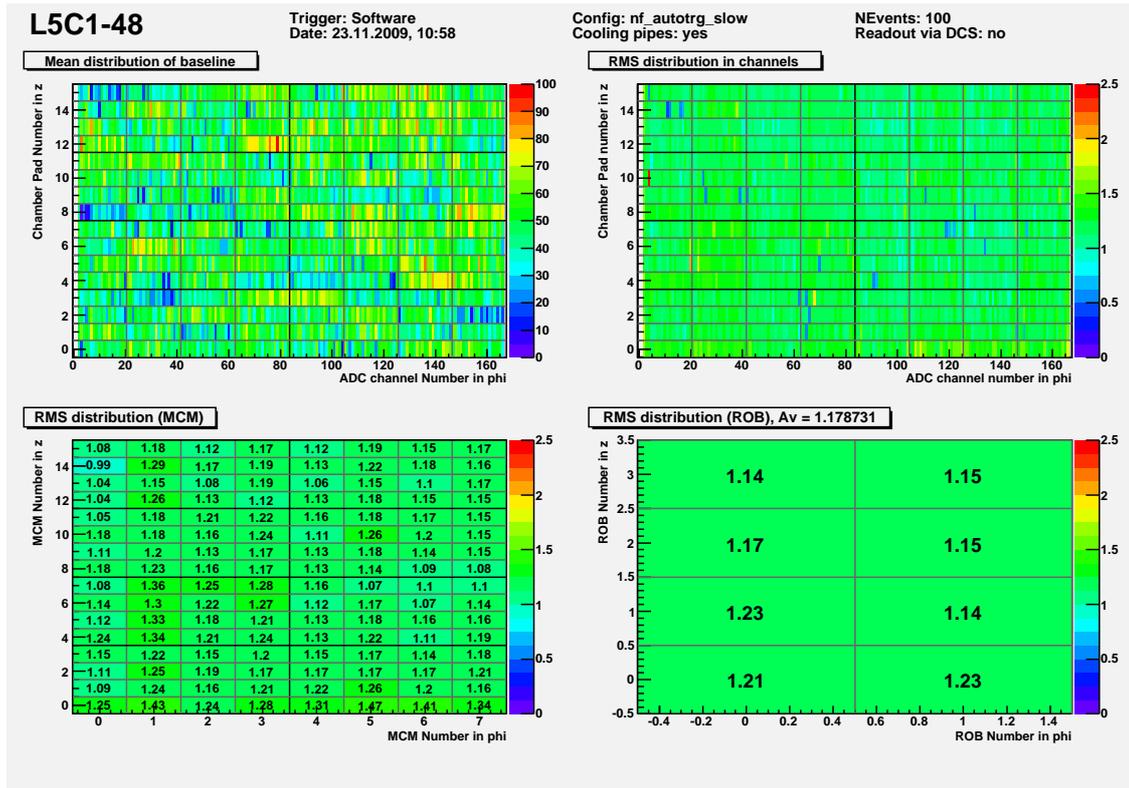


Abb. C.1: Messung des Rauschverhaltens von L5C1 048 in NF-Konfiguration. Die roten Kanäle in der Signalverteilung im Mean sind in der NF-Konfiguration normal. Die Kammer entspricht etwa dem Durchschnitt.

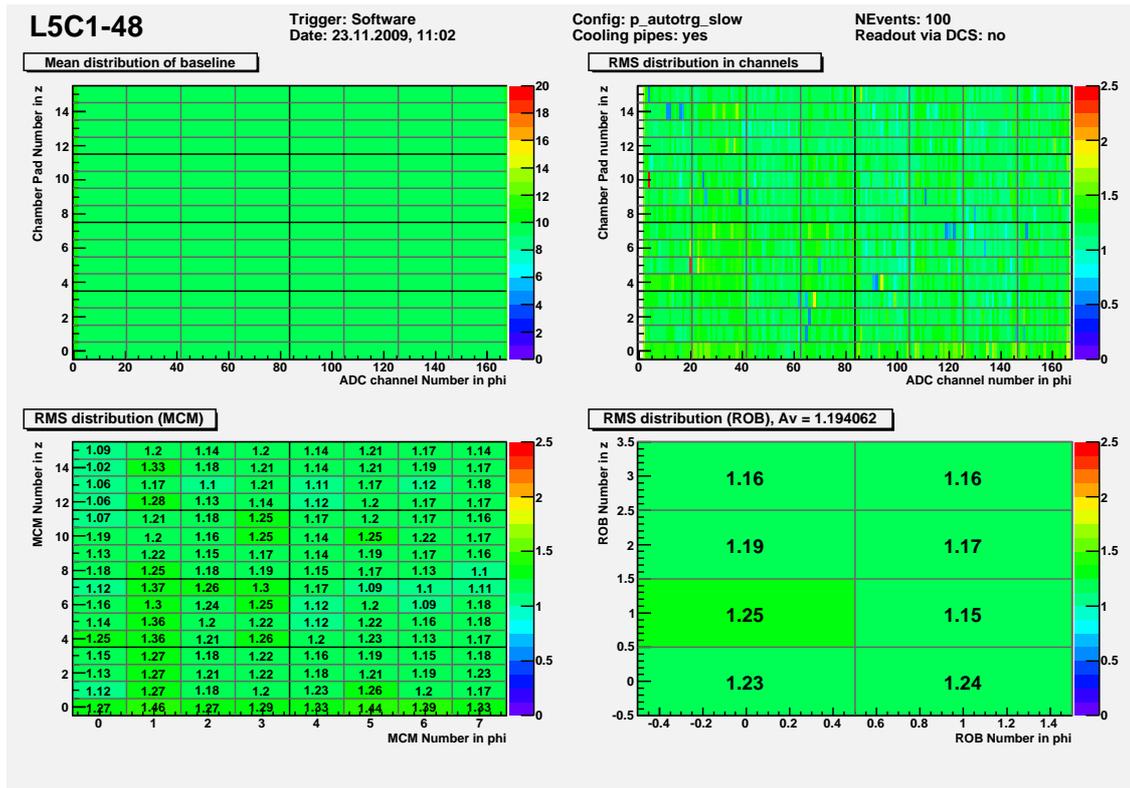


Abb. C.2: Messung des Rauschverhaltens von L5C1 048 in P-Konfiguration. Hier ist gut zu sehen, dass der Pedestal-Filter die Baseline der einzelnen Kanäle aneinander angeglichen hat: Die Signalverteilung im Mean ist einheitlich bei einer Signalthöhe von ca. 10.

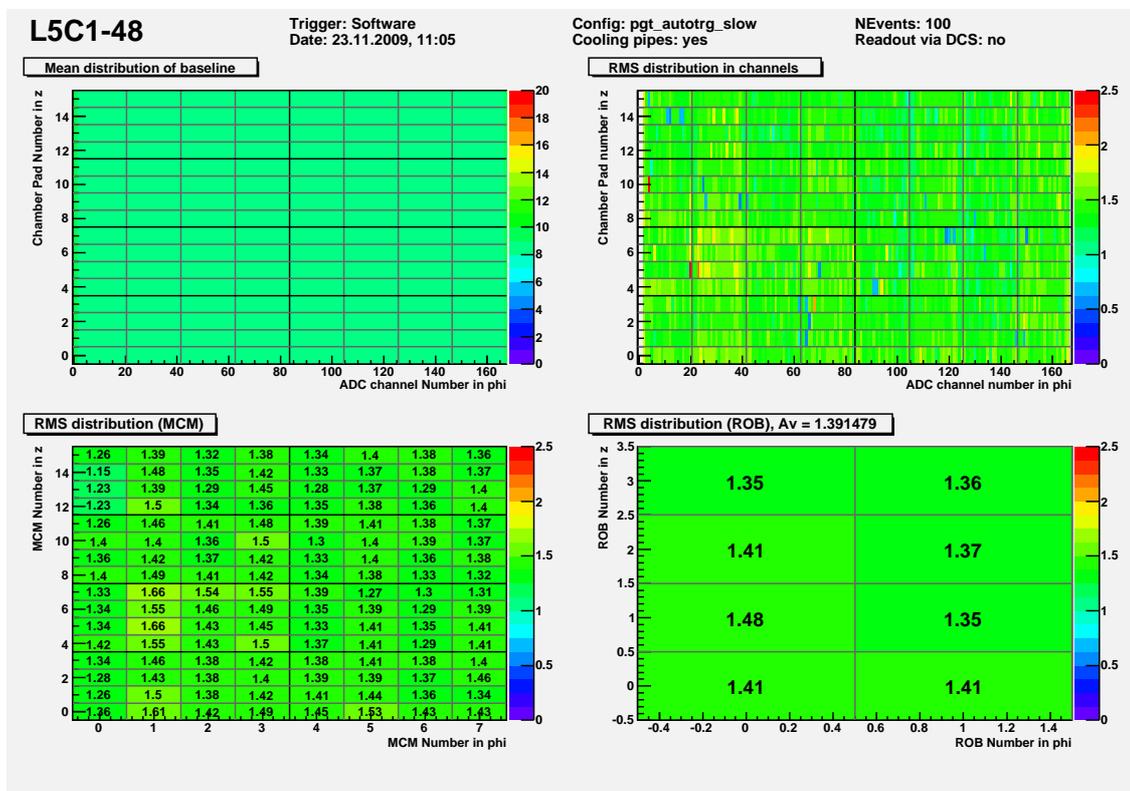


Abb. C.3: Messung des Rauschverhaltens von L5C1 048 in PGT-Konfiguration. Auch hier hat der Pedestal-Filter die Baseline angeglichen.

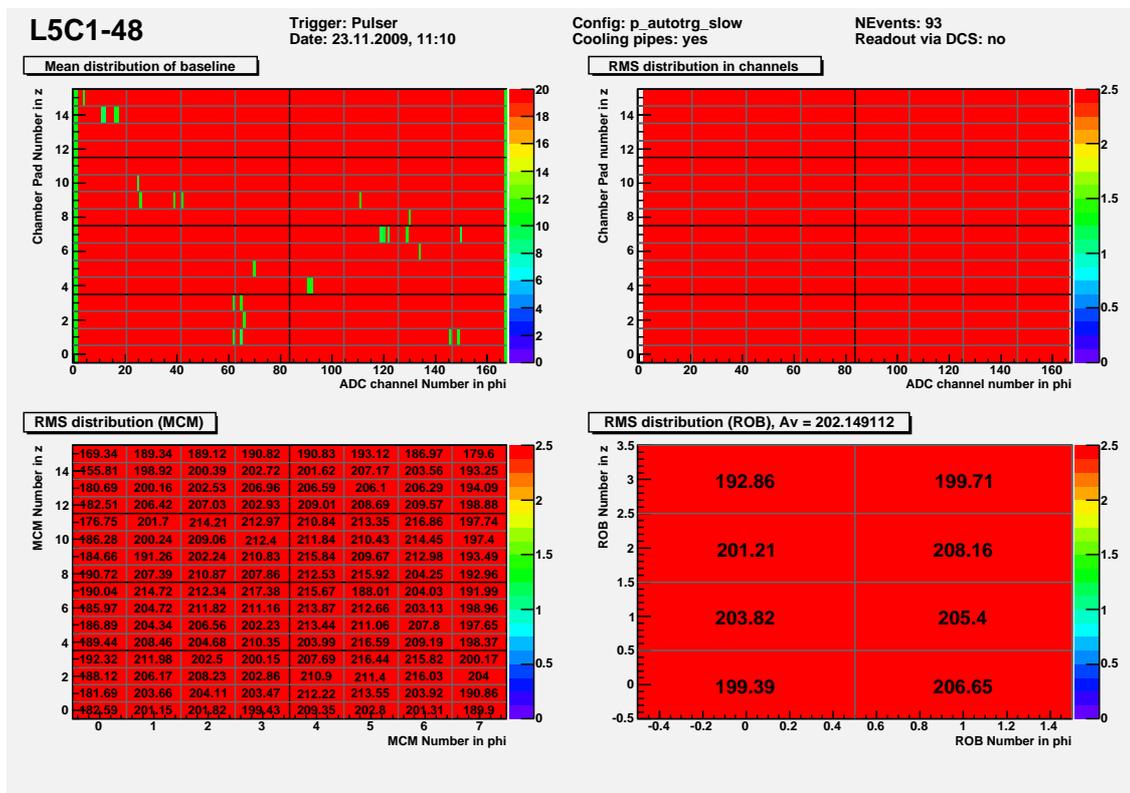


Abb. C.4: Pulsertest von L5C1 048 in P-Konfiguration: Obwohl einige Kanäle nicht rot sind, liefert dieser Plot dennoch ein zufriedenstellendes Ergebnis.

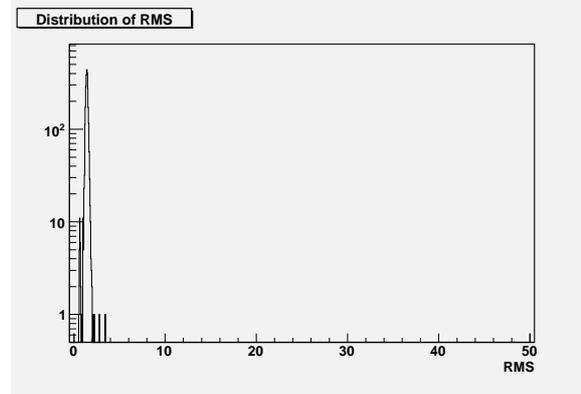
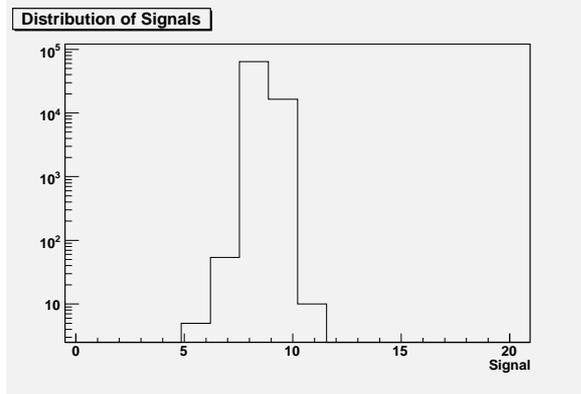
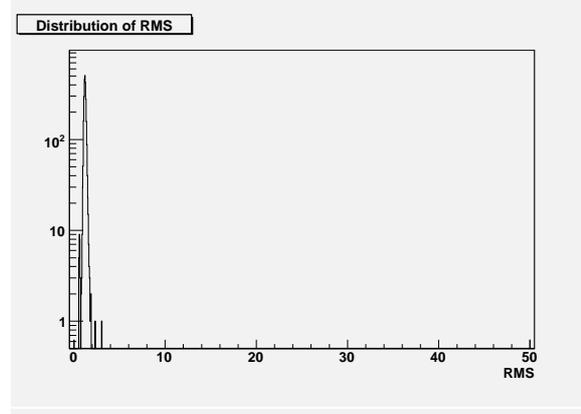
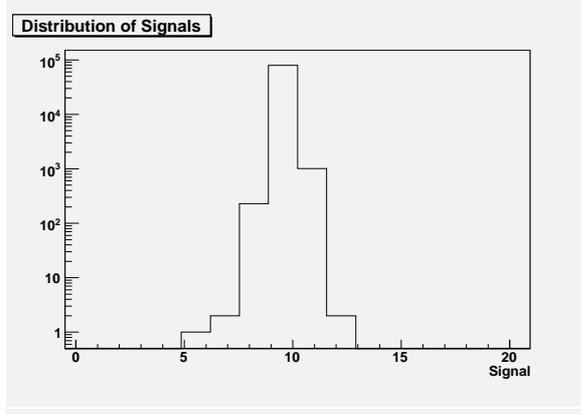
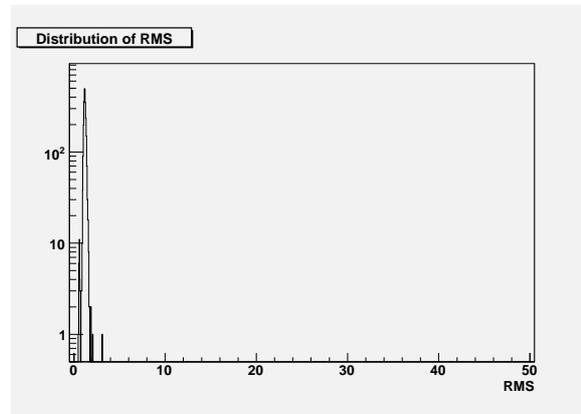
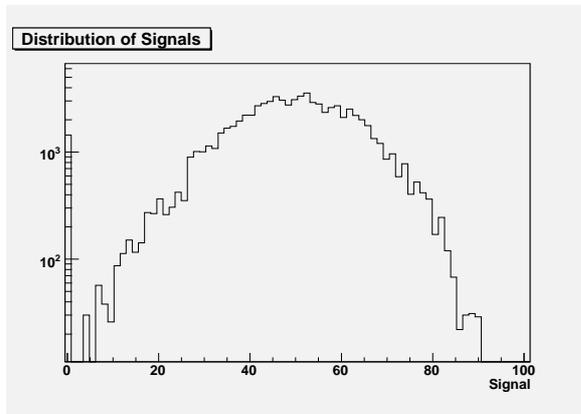


Abb. C.5: Signalverteilung im Mean (links) und im RMS (rechts) von L5C1 048 in NF- (oben), P- (mitte) und PGT-Konfiguration (unten). In P-Konfiguration ist in der Mean-Signalverteilung die Arbeit des Pedestal-Filters gut zu beobachten. Während die Verteilung in NF-Konfiguration einer Verteilungskurve entspricht, ist die Verteilung in P-Konfiguration ähnlich einer einzelnen Säule. Der Pedestal-Filter hat die einzelnen Kanäle aneinander angeglichen (durch Baseline-Subtraktion). Gegenüber den entsprechenden Plots der P-Konfiguration hat sich in PGT-Konfiguration kaum etwas geändert.

C.2 Supermodul VIII

Hier ist eine Übersicht über das Rauschverhalten aller L5-Kammern des Supermodul VIII gegeben. Einige Testwerte mussten mit einer anderen Software ausgewertet werden, daher unterscheiden sich einige der Plots von den anderen (L5C1 046 in NF und PGT, sowie L5C1 068 in allen drei Konfigurationen). Die Ergebnisse der Tests sind unauffällig.

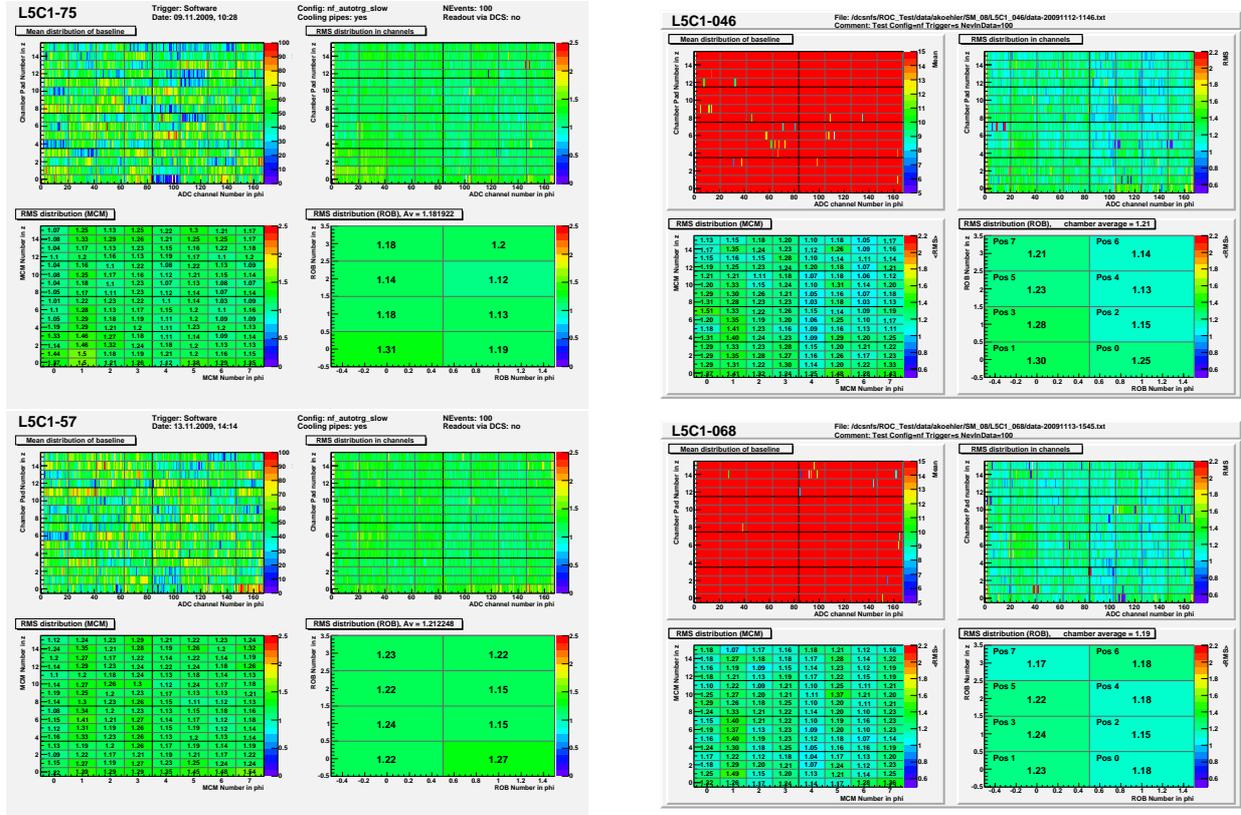


Abb. C.6: Kammern des SMVIII in NF-Konfiguration. Die Messungen der Kammern L5C1 046 und L5C1 068 wurden mit einem anderen Programm ausgewertet, daher weicht das Erscheinungsbild der Plots ab.

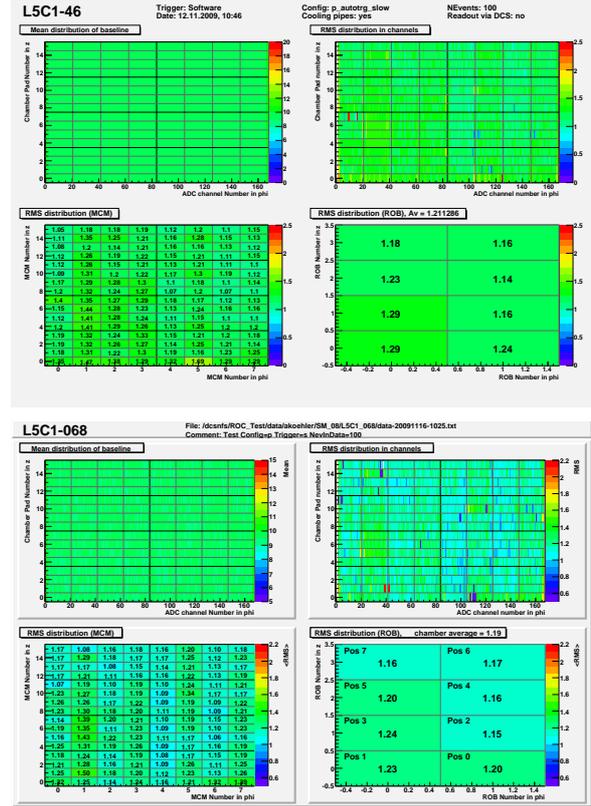
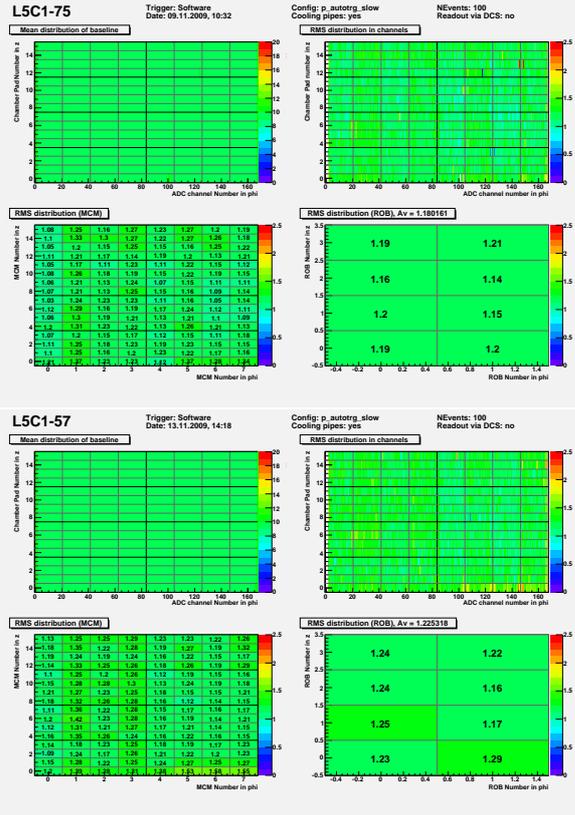


Abb. C.7: Kammern des SMVIII in P-Konfiguration. Die Messungen der Kammer L5C1 068 wurden mit einem anderen Programm ausgewertet, daher weicht das Erscheinungsbild des Plots ab.

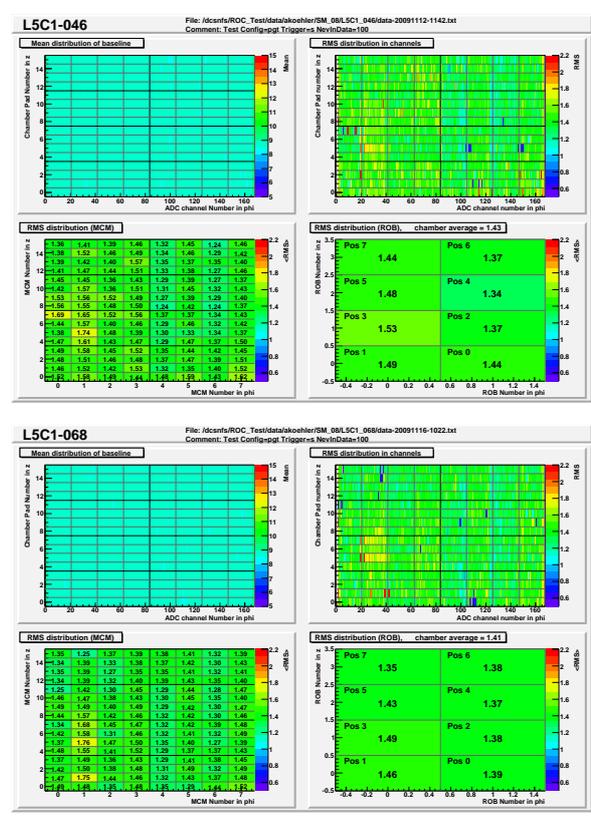
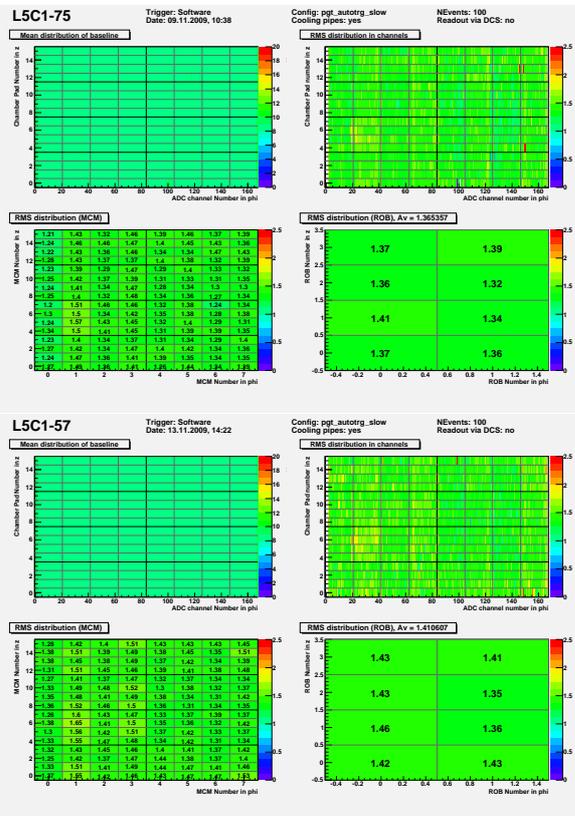


Abb. C.8: Kammern des SMVIII in PGT-Konfiguration. Die Messungen der Kammern L5C1 046 und L5C1 068 wurden mit einem anderen Programm ausgewertet, daher weicht das Erscheinungsbild der Plots ab.

C.3 Supermodul IX

Hier ist eine Übersicht über das Rauschverhalten aller L5-Kammern des Supermodul IX gegeben. Einige Testwerte mussten mit einer anderen Software ausgewertet werden, daher unterscheiden sich einige der Plots von den anderen (L5C1 024 in allen drei Konfigurationen). Die Ergebnisse der Tests sind unauffällig, lediglich L5C1 055 ist im Bereich des DCS-Boards etwas laut. Dies konnte auf die Cooling-Pipe des DCS-Boards zurückgeführt werden, die als Antenne fungierte und so das erhöhte Rauschen verursachte. Dies wurde behoben, indem die Cooling-Pipe durchtrennt und ein isolierendes Schlauchstück eingefügt wurde. Die „Antenne“ wurde so verkleinert, der Einfluss auf die MCMs in der Nähe reduziert.

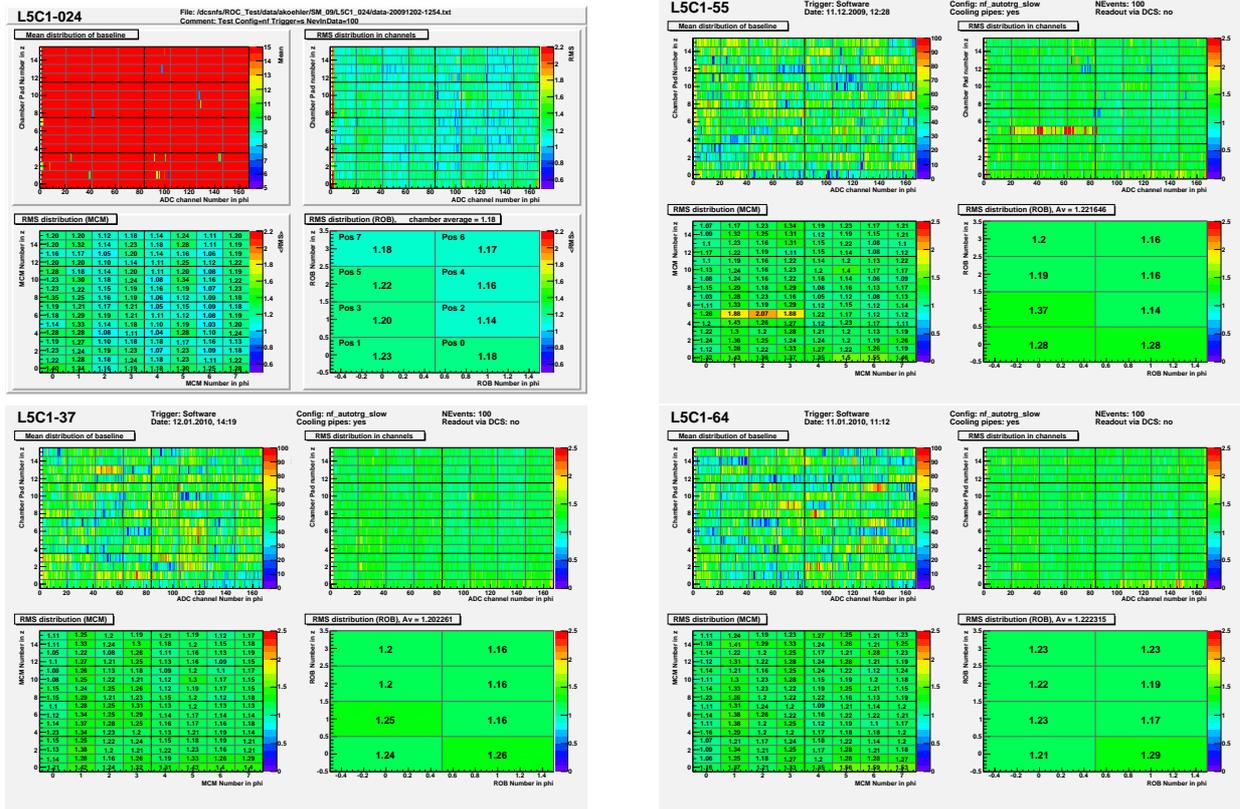


Abb. C.9: Kammern des SMIX in NF-Konfiguration. Die Messungen der Kammer L5C1 024 wurden mit einem anderen Programm ausgewertet, daher weicht das Erscheinungsbild des Plots ab.

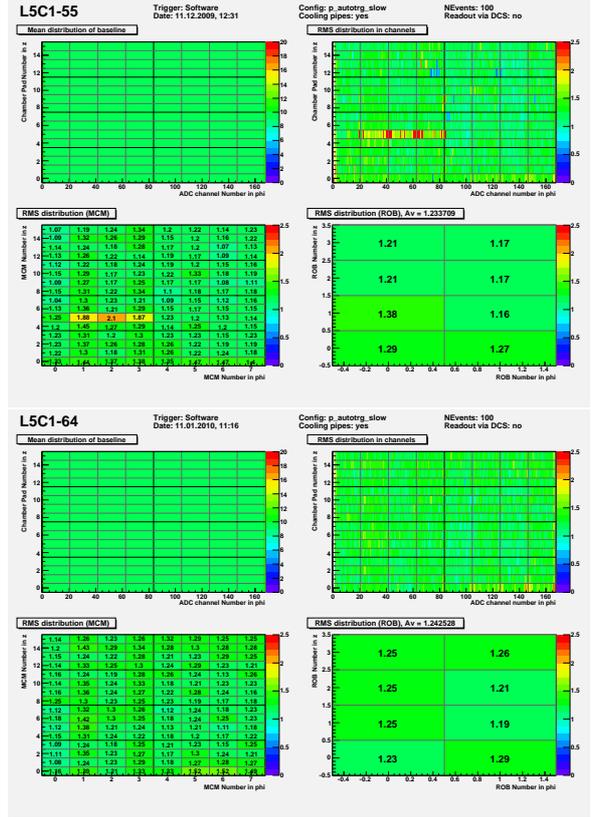
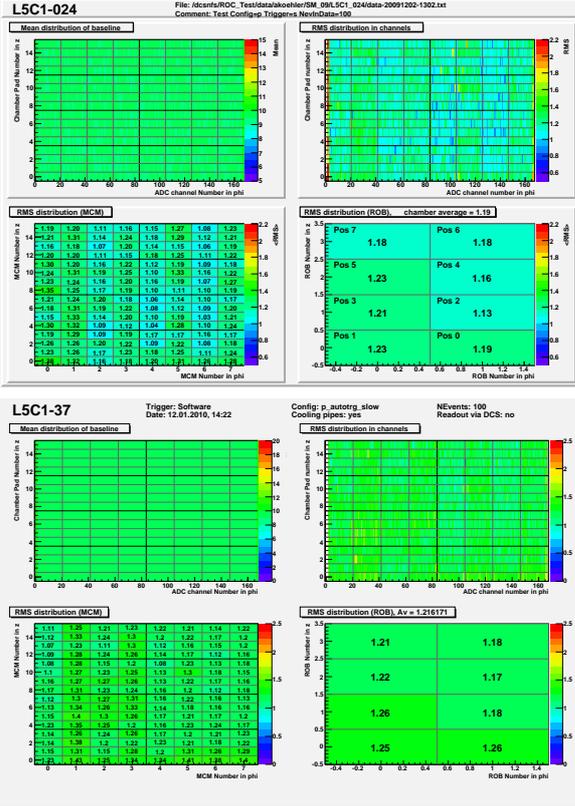


Abb. C.10: Kammern des SMIX in P-Konfiguration. Die Messungen der Kammer L5C1 024 wurden mit einem anderen Programm ausgewertet, daher weicht das Erscheinungsbild des Plots ab.

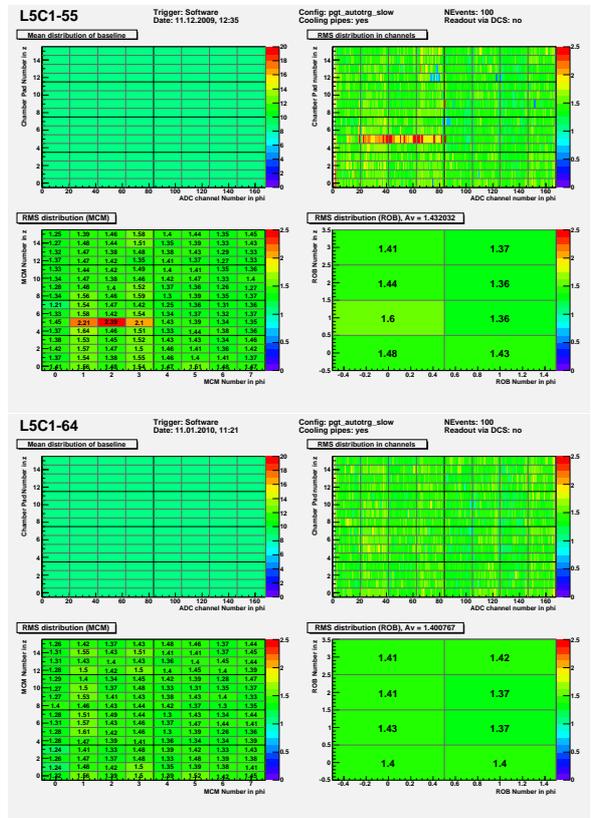
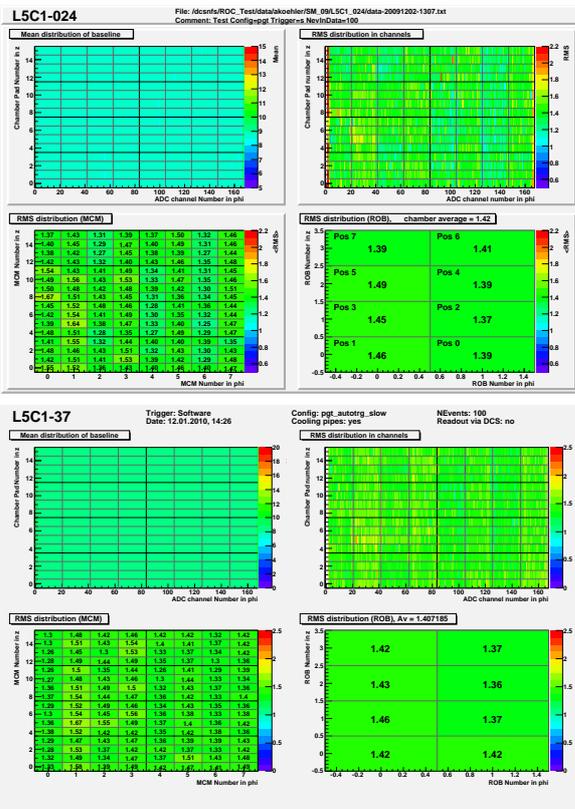


Abb. C.11: Kammern des SMIX in PGT-Konfiguration. Die Messungen der Kammer L5C1 024 wurden mit einem anderen Programm ausgewertet, daher weicht das Erscheinungsbild des Plots ab.

C.4 Supermodul X

Hier ist eine Übersicht über das Rauschverhalten aller L5-Kammern des Supermodul X gegeben. Die Ergebnisse der Tests sind unauffällig.

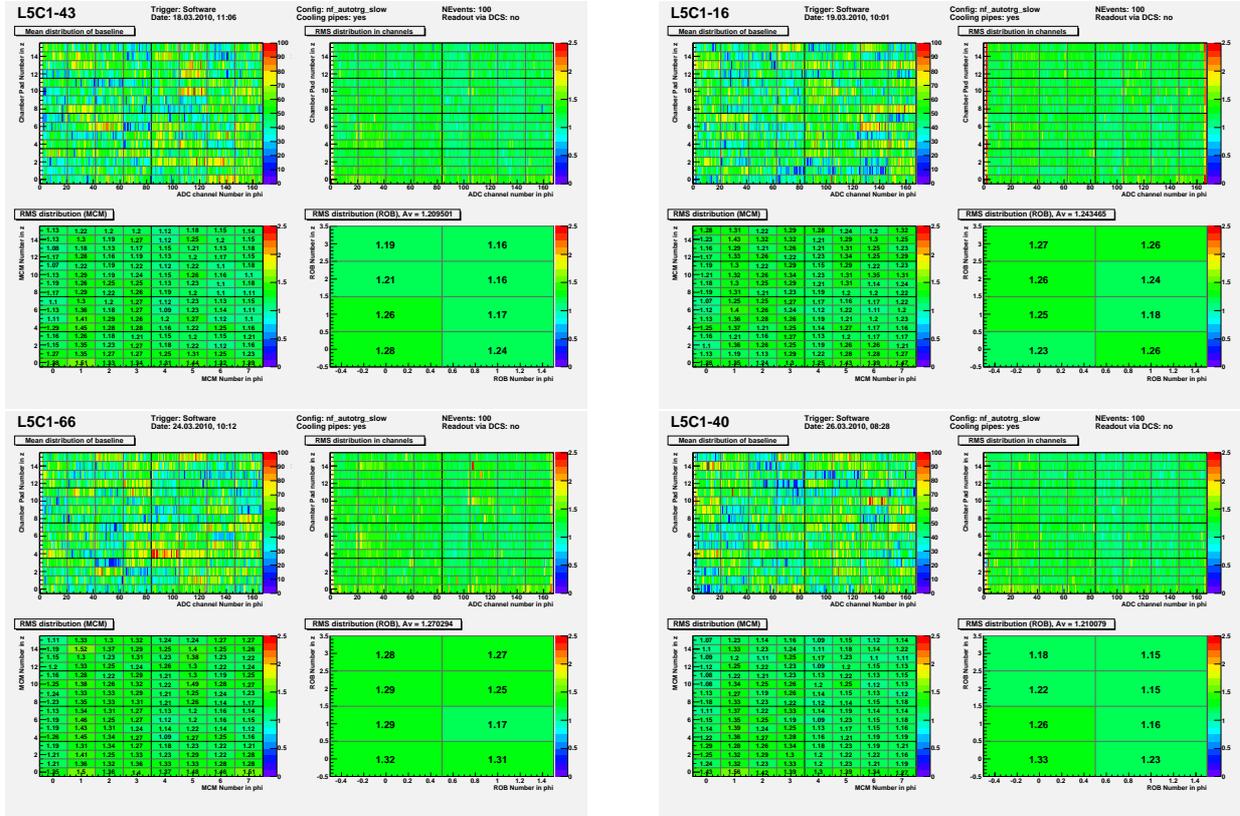


Abb. C.12: Kammern des SMX in NF-Konfiguration.

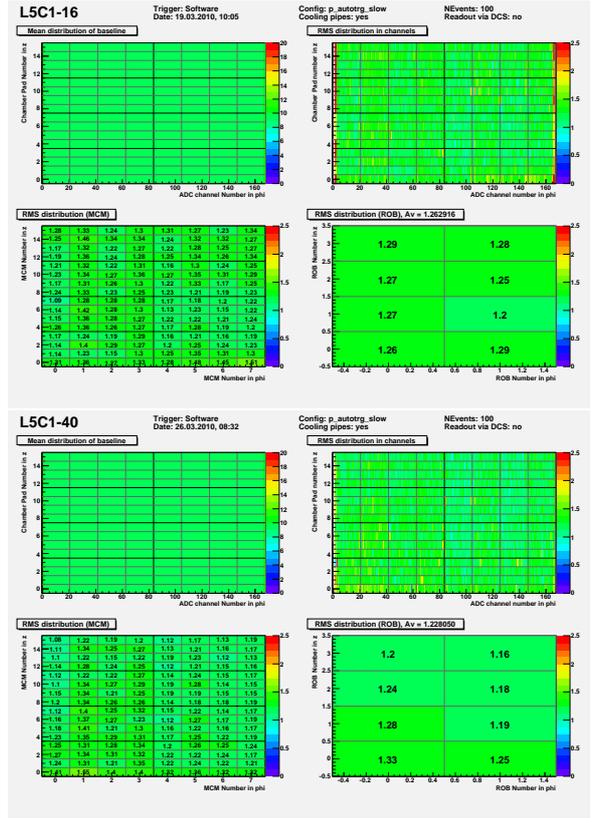
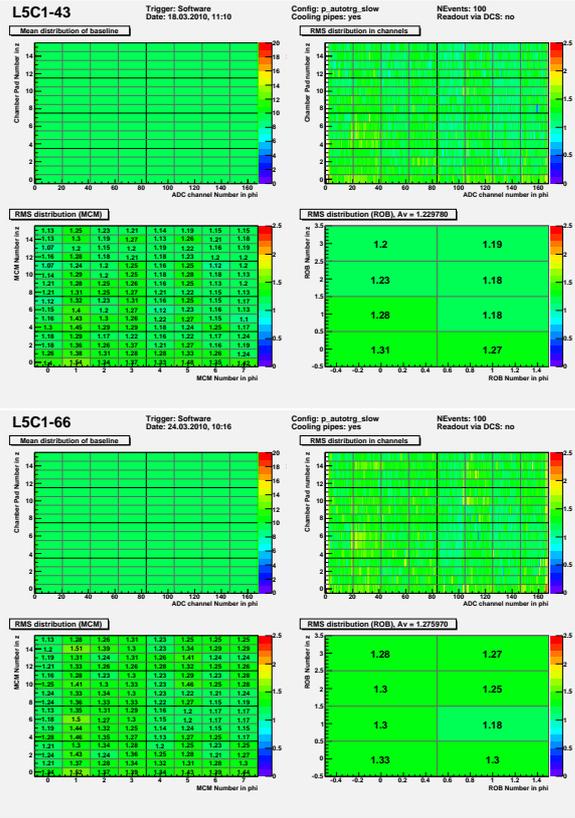


Abb. C.13: Kammern des SMX in P-Konfiguration.

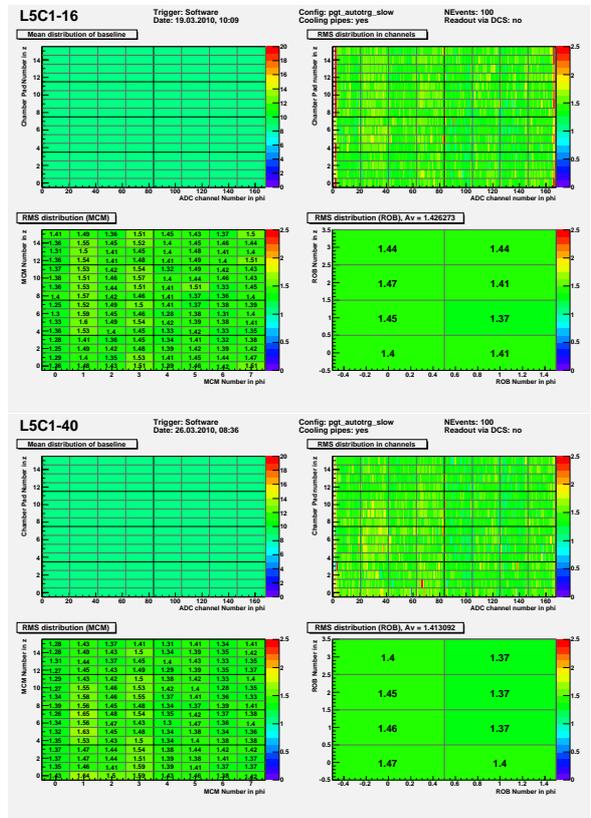
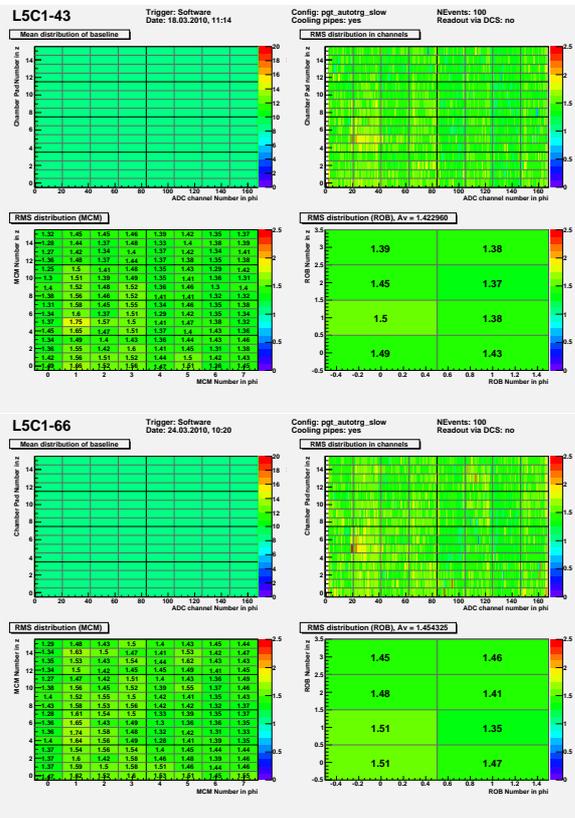


Abb. C.14: Kammern des SMX in PGT-Konfiguration.

Literaturverzeichnis

- [1] Povh; Rith; Scholz; Zetsche. *Teilchen und Kerne*, 7. Auflage. Springer, 2006.
- [2] Contemporary Physics Education Project. *Standard Model of Physical Interactions and Particles*. 2006.
- [3] Particle Data Group. *Particle Data Booklet*. 2008.
- [4] Chris Quigg. *Higgs Bosons, Electroweak Symmetry Breaking, and the Physics of the Large Hadron Collider*. FermiLab, Februar 2008.
- [5] Wikipedia-Website: <http://de.wikipedia.org/wiki/baryon>.
- [6] Wikipedia-Website: <http://de.wikipedia.org/wiki/meson>.
- [7] Wikipedia-Website: <http://de.wikipedia.org/wiki/lhc>.
- [8] CERN ATLAS-Website: <http://public.web.cern.ch/public/en/lhc/atlas-en.html>.
- [9] CERN CMS-Website: <http://public.web.cern.ch/public/en/lhc/cms-en.html>.
- [10] CERN LHCb-Website: <http://public.web.cern.ch/public/en/lhc/lhcb-en.html>.
- [11] ALICE Collaboration. *The ALICE-Experiment at the CERN LHC*. Institute of Physics Publishing and SISSA, August 2008.
- [12] CERN ALICE-Website: <http://aliceinfo.cern.ch/public/en/chapter2/chap2experiment-en.html>.
- [13] ALICE Collaboration. *Technical Design Report of the (ALICE) Inner Tracking System*. Juni 1999.
- [14] ALICE Collaboration. *Technical Design Report of the (ALICE) Time Projection Chamber*. Januar 2000.
- [15] ALICE Collaboration. *Technical Design Report of the (ALICE) Time Of Flight*. Februar 2000.
- [16] ALICE Collaboration. *Technical Design Report of the (ALICE) High Momentum Particle Identification Detector*. August 1998.
- [17] ALICE Collaboration. *Technical Design Report of the (ALICE) Photon Spectrometer*. März 1999.
- [18] ALICE Collaboration. *Technical Design Report of the (ALICE) Muon Spectrometer*. August 1999.
- [19] ALICE Collaboration. *Technical Design Report of the (ALICE) Photon Multiplicity Detector*. September 1999.
- [20] ALICE Collaboration. *Technical Design Report of the (ALICE) Zero Degree Calorimeter*. März 1999.
- [21] ALICE Collaboration. *Technical Design Report of the (ALICE) Electromagnetic Calorimeter*. September 2008.
- [22] ALICE Collaboration. *Technical Design Report of the (ALICE) Forward Detectors: FMD, T0 and V0*. September 2004.
- [23] CERN LHCf-Website: <http://public.web.cern.ch/public/en/lhc/lhcf-en.html>.
- [24] CERN TOTEM-Website: <http://public.web.cern.ch/public/en/lhc/totem-en.html>.
- [25] ALICE-Collaboration. *A Transition Radiation Detector for Electron Identification within the ALICE Central Detector*. Mai 1999.
- [26] John D. Jackson. *Klassische Elektrodynamik*, 3. Auflage. deGruyter, January 2002.
- [27] Christian Lippmann. *Transition Radiation Spectra of Electrons from 1 to 10 GeV/c in Regular and Irregular Radiators*. November 2005.
- [28] Rainer Schicker. ALICE: Physics with Electrons. Vortrag bei „Physics at LHC, 13-17 Juli 2004, Wien“.

-
- [29] GSI ALICE-Gallery: <http://www-alice.gsi.de/trd/gallery/index.html>.
- [30] Benjamin Dönigus. Assembly and Tests of the first Supermodule of the ALICE Transition Radiation Detector. Diplomarbeit, April 2007.
- [31] ALICE Collaboration. *Technical Design Report of the (ALICE) Transition Radiation Detector*. Oktober 2001.
- [32] Andreas Köhler. Elektronikintegration und Test von ALICE-TRD Ausleseammern. Master-Proposal, September 2009.

Danksagung

Ich möchte allen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen und mich unterstützt haben.

Besonderer Dank geht an Herrn Prof. Dr. P. Braun-Munzinger und Herrn Dr. A. Andronic für die Betreuung und Unterstützung bei dieser Arbeit und das Vertrauen, das eine freie und selbstständige Arbeit ermöglichte.

Weiterhin möchte ich weiteren Mitarbeitern der ALICE-Gruppe für die gute Zusammenarbeit und die Arbeitsatmosphäre meinen Dank aussprechen, insbesondere Herrn B. Dönigus und Herrn M. Freudenberger für die anregende Gespräche und Diskussionen, ohne die diese Arbeit schwieriger durchzuführen gewesen wäre.

Ich danke auch meiner Familie und meiner Freundin, die mir das Physikstudium ermöglicht haben und mir immer zur Seite stehen.

An dieser Stelle sei nun auch B. Sommer für alle Korrekturen und Hinweise auf unmögliche Formulierungen und Satzkonstruktionen gedankt.

Unvergessen sind natürlich alle, die nicht direkt zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, aber dennoch auf viele Arten eine Hilfe waren und für Abwechslung gesorgt haben.